

Pro Gradu -tutkielma  
Geofysiikka

# Suolaisuuden ja lämpötilan vaihtelu Pohjanlahdella perustuen FerryBox -dataan

Cecilia Äijälä

4.9.2019

Ohjaaja: FT Laura Tuomi

Tarkastaja: Professori Petteri Uotila  
FT Laura Tuomi

HELSINGIN YLIOPISTO  
INSTITUTE FOR ATMOSPHERIC AND EARTH SYSTEM RESEARCH  
PL 42 (Gustaf Hällströmin katu 2a)  
00560 Helsingin yliopisto



Tiedekunta — Fakultet — Faculty		Laitos — Institution — Department	
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Institute for Atmospheric and Earth System Research	
Tekijä — Författare — Author			
Cecilia Äijälä			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Suolaisuuden ja lämpötilan vaihtelu Pohjanlahdella perustuen FerryBox -dataan			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Geofysiikka			
Työn laji — Arbetets art — Level		Aika — Datum — Month and year	
Pro Gradu -tutkielma		4.9.2019	
		Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages	
		62 pages	
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>Itämeren ja sen tilan tutkimus on perustunut rannikon läheisyydessä oleviin mittausasemiin sekä seurantamatkoihin, joita esim. Pohjanlahdella tehdään noin 4 kertaa vuodessa. Viimeisen parinkymmenen vuoden aikana Itämerellä ollaan kuitenkin alettu käyttämään kauppalaivoihin asennettuja läpivirtauslaitteistoja eli niin sanottuja FerryBoxeja, eli niin sanottuja SOOP:eja (ship of opportunity). Automaattiset mittausmenetelmät ovat lisääntyneet viime vuosina ja FerryBox on yksi niistä. Tässä tutkielmassa keskitytään Pohjanlahdella kulkevan M/V Transpaper -aluksen FerryBoxin suolaisuus- ja lämpötilamittauksiin. Keskeisiä kysymyksiä ovat: onko data luotettavaa, mitä data kertoo suolaisuuden ja lämpötilan alueellisista ja ajallisista muutoksista, sekä miten sitä voi hyödyntää Itämeren tilan seurannassa.</p> <p>Tässä työssä käytetty data on haettu CMEMS -palvelusta. Data sisälsi jonkin verran epäluotettavia havaintoja, joten sille tehtiin ylimääräinen laadunvarmennus. Laatutarkastettu data vastasi hyvin lähettyvillä tehtyjä CTD -mittauksia sekä reitin varrella olevia pysyviä mittausasemia. CTD- ja FerryBox -mittausten välillä on vahva korrelaatio. Data sopii hyvin suolaisuuden ja lämpötilan tutkimiseen Itämerellä, kunhan datan laatu on varmistettu.</p> <p>Suolaisuusdatasta nähdään hyvin vuosikierto, pintaveden ollen kesällä vähäsuolaisempaa kuin talvella. Pintasuolaisuus vaihtelee eniten rannikon lähellä Perämerellä ja Merenkurkun eteläosassa, jossa keskihajonta on jopa 0,7 ja vähiten Perämeren keskiosissa ja Selkämeren keski- ja eteläosissa, jossa se on alle 0,2. Vaikka vuosikierto on selvästi nähtävissä, nähdään myös selviä eroja vuosien välissä. Mittausajanjaksosta 2009–2017 vuodet 2016 ja 2017 olivat keskimääräistä vähäsuolaisempia ja 2011–2012 tavanomaista suolaisempaa. Myös lämpötilassa näkyy selvä vuosikierto, sekä vuosien välistä vaihtelua. Ajanjakson lämpimin vuosi oli 2014 ja kylmin 2017. Lämpötilan kuukausikeskiarvoista näkee, että ne ovat selvästi lämpimämmät kuin aiemmin kirjallisuudessa esitetyt lämpötilanarvot. Pintaveden lämpötila oli varsinkin pohjoisessa syksyllä kirjallisuudessa olevia arvoja lämpimpää. Varsinkin Perämerellä lokakuussa keskiarvolämpötila oli 6,7°C–10°C, joka on ylärajaltaan 4°C korkeampi kuin kirjallisuuden 4–6°C. Tämä oli oletettua, koska kirjallisuudessa käytetyt arvot ovat 70-luvun alussa julkaistuja ja muutkin tutkimukset ovat todenneet pintavesien lämpenemisen.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
FerryBox, SOOP, Suolaisuus, Lämpötila, Itämeri, Pohjanlahti			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
Muita tietoja — övriga uppgifter — Additional information			



# Sisältö

<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
1.1 Itämeren tutkimuksen kehitys . . . . .	1
1.1.1 SOOP:ien historiasta . . . . .	3
1.1.2 SOOP:ien nykytilanne . . . . .	7
1.2 Pohjanlahden ja pohjoisen Itämeren hydrografia . . . . .	9
1.2.1 Vuodenaikaisvaihtelu . . . . .	9
1.2.2 Vedenvaihto . . . . .	11
1.2.3 Suolaisuus ja lämpötila . . . . .	12
<b>2 Materiaalit ja Metodit</b>	<b>14</b>
2.1 FerryBox . . . . .	14
2.1.1 Yleinen toimintaperiaate . . . . .	15
2.1.2 Transpaperin FerryBox . . . . .	16
2.1.3 FerryBox -data . . . . .	18
2.2 CTD -data . . . . .	22
2.3 Pysyvät mittausasemat . . . . .	23
2.4 Vertailumittausten statistiikasta . . . . .	23
<b>3 Tulokset ja Keskustelu</b>	<b>25</b>
3.1 Vertailu muihin datasetteihin . . . . .	25
3.1.1 CTD -data . . . . .	25

3.1.2	Vertaus kiinteisiin mittausasemiin . . . . .	31
3.2	Suolaisuuden alueelliset keskiarvot . . . . .	36
3.3	Suolaisuuden vaihtelu . . . . .	39
3.4	Lämpötila . . . . .	45
3.5	Ferryboxin hyödyt tutkimuksessa ja seurannassa . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>Kiitokset</b>	<b>54</b>
	<b>Kirjallisuus</b>	<b>55</b>

# 1. Johdanto

Itämeren ympärillä on 14 valtiota joissa asuu yhteensä 85 miljoonaa ihmistä. Elin-  
tapamme vaikuttavat meren tilaan muun muassa kasvihuonepäästöjen aiheuttaman  
ilmastonmuutoksen sekä ravinne- ja saastepäästöjen kautta. Itämeren tutkimus ja  
meren tilan seuranta on näin ollen tärkeää. Meri vaikuttaa elämäämme muun muas-  
sa paikallisen ilmaston kautta. Siispä on oleellista tutkia Itämeren fysikaalisia ja  
biologisia ominaisuuksia sekä niiden muutosta, jotta voitaisiin paremmin suojella ja  
parantaa meren tilaa, sekä ennakoida mahdollisia muutoksia.

Tässä tutkielmassa keskitytään Pohjanlahdella kulkevan rahtilaivan mittaa-  
maan suolaisuus- ja lämpötiladataan. Keskeisiä kysymyksiä ovat onko data luotet-  
tavaa ja miten sitä voisi käyttää suolaisuuden ja lämpötilan seurantaan.

## 1.1 Itämeren tutkimuksen kehitys

Itämerta sekä sen fysikaalisia ominaisuuksia on seurattu 1800-luvun lopulta alkaen.  
Ensimmäiset hydrografiset tutkimukset Itämerellä tehtiin vuonna 1871 laivalla ni-  
meltä R/V Pommernia. Tämä tutkimusmatka kattoi Itämeren Tukholmasta ete-  
lään olevaan alueen (Meyer et al., 1873; Leppäranta ja Myrberg, 2009). Vuonna  
1877 ruotsalaisen F.L. Ekmanin tutkimusretki kävi Alfhild -nimisellä laivalla alu-  
eellisesti kattavammalla tutkimusmatkalla, jossa tutkittiin koko Itämerta Suomen-  
ja Riianlahtea lukuun ottamatta. Matkalla kerättiin 1800 vesinäytettä, joista ana-  
lysoitiin mm. lämpötilaa ja suolaisuutta sekä suoritettiin meteorologisia mittauksia

(F. L. Ekman ja Pettersson, 1892). Pian tämän jälkeen alettiin myös järjestelmällisesti seurata hydrografiassa tapahtuvia muutoksia (Pettersson ja G. Ekman, 1897).

Samoihin aikoihin aloitetut säännölliset jäähavainnot sekä kiinteiden hydrografisten asemien toiminta laajenivat 1880-luvulla. Vuonna 1890-luvulla ruotsalaiset, saksalaiset ja tanskalaiset aloittivat säännölliset seurantamittausmatkat Itämerellä, ja 1898 oli Suomen ensimmäinen tutkimusmatka (Leppäranta ja Myrberg, 2009).

Alussa mittaukset olivat manuaalisia, ja esimerkiksi suolaisuus mitattiin vesinäytteistä laboratoriossa. Elektroniikan kehityksen myötä saatiin kuitenkin tarvittavaa tekniikkaa uusiin automaattisiin mittalaitteisiin. Jacobsen (1948) artikkelissa kuvattiin ensimmäinen laite, joka mittaa sekä lämpötilaa että suolaisuutta yhtäjaksoisesti. Vastaavat STD<sup>1</sup> -luotaimet tulivat käyttöön 1960-luvulla (Baker, 1981). Näissä STD -luotaimissa ei vielä ollut sisäistä laskentatehoa, joten suolaisuus jouduttiin laskemaan analogisesti lämpötilasta ja sähkönjohtavuudesta. Laitteessa oli jonkin verran käytännön ongelmia, koska lämpötila- ja johtavuusmittaukset eivät tapahtuneet samanaikaisesti. Myöhemmin tietotekniikan kehitys ja elektroniikan hinnan lasku mahdollistivat uusien tarkempien laitteiden kehityksen, joissa oli riittävästi laskentatehoa. Uusi CTD<sup>2</sup> -luotain teki tarkkoja nopeampia mittauksia nopeammalla tahdilla kuin vanha STD -luotain ja pystyi laskemaan suolaisuuden itse. Ensimmäisen kuvauksen tällaisesta CTD -luotaimesta on Bakerin (1981) mukaan antanut Brown vuonna 1974.

Nykyään Itämerellä on kymmeniä vakituisia mittausasemia, joissa tehdään havaintoja vuosittain seurantamatkoilla, ja näiden lisäksi tehdään yksittäisiä mittauksia tutkimuskampanjoiden yhteydessä. Itämerelle on myös asennettu monia automaattisesti mittaavia laitteita, kuten aallokkoa ja pintalämpötilaa mittaavia poiju-

---

<sup>1</sup>Salinity, Temperature, Depth eli suolaisuus, lämpötila, syvyys

<sup>2</sup>Conductivity, Temperature, Depth eli sähkönjohtavuutta, lämpötilaa ja syvyyttä mittaava luotain



ja, akustisia virtausmittareita (ADCP)<sup>3</sup>, sekä koko vesipatsasta mittaavia laitesarjoja. Kaukokartoitus on myös tärkeä menetelmä Itämeren pintakerroksen seurannassa, koska sillä pystytään tehokkaasti seuraamaan mm. pintalämpötilaa ja leväkukintoja. Viime vuosina Itämerellä on myös otettu käyttöön autonomisia vedenalaisia mittalaitteita (AUV)<sup>4</sup>, kuten Argo -poijuja, jotka välittävät tietoja satelliittiyhteyksien avulla. Esimerkiksi Ilmatieteen laitoksella on ollut Argo -poijuja Itämerellä vuodesta 2011 (Purokoski et al., 2013).

Näiden kaikkien lisäksi viimeisten vuosikymmenten aikana ollaan Itämerellä otettu käyttöön niin kutsuttuja SOOP<sup>5</sup> -mittalaitteita (matkustaja- ja rahtilaivoja, jotka mittaavat jatkuvasti laivan reitillä). Näin saadaan tiheämpää mittausdataa tietyltä reitiltä ja on mahdollista saada parempi kuva Itämerellä tapahtuvista lyhytaikaisemmista ilmiöistä ja ääritilanteista kuin mitä harvoin vierailtujen monitorintiasemien datan perusteella saisi. Myös alueellinen kattavuus on parempi kuin yksittäisillä kiinteillä mittausasemilla saatava.

### 1.1.1 SOOP:ien historiasta

Ajatus siitä että kauppalaivoja käytettäisiin apuna tieteellisten mittauksen tekemiseen ei ole uusi. Jo 1853 pidetyssä konferenssissa Brysselissä<sup>6</sup> päätettiin ensimmäisestä kansainvälisestä standardista, jolla kirjata ylös havaintoja. Lisäksi sovittiin meteorologisten ja oseanografisten havaintojen raportoinnin koordinoinnista (Petersen, 2014). Jo ennen tätä laivoilla oltiin vuosisatojen ajan kirjattu lokikirjoihin havaintoja muun muassa säästä ja veden lämpötilasta.

Mittalaitteitakin on asennettu kauppalaivoille jo lähes vuosisadan ajan. Vuon-

---

<sup>3</sup>Acoustic Doppler Current Profiler eli akustinen virtausmittari

<sup>4</sup>Autonomus Underwater Vehicle

<sup>5</sup>Ship of Opportunity

<sup>6</sup>“First International Maritime Conference Held for Devising an Uniform System of Meteorological Observations at Sea”

na 1931 Sir Alistair Hardy (Reid et al., 2003; McQuatters-Gollop, 2013) alkoi kerätä säännöllistä dataa eläinplanktonista Pohjanmerellä CPR-laitteella (Continuous plankton recorder = Jatkuvasti toimiva plankton-tallennin). CPR:tä vedetään laivan perässä jolloin se kerää vedessä olevat planktonit kahden silkkifilmin väliin. Näytteet analysoidaan myöhemmin laboratoriossa, joten laitteisto ei ole täysin automatisoitu. Samoihin aikoihin 1930-luvulla Norjalaiset alkoivat keräämään suolaisuus- ja lämpötiladataa Hurtigruttenilla ST-halinograafilla<sup>7</sup> (Petersen, 2013; Petersen, 2014).

Itämerellä CPR:tä kokeiltiin pilottiprojektina vuosina 1998-99, jolloin huomattiin ettei mittalaite toiminut optimaalisesti, koska plankton Itämerellä on pienempää kuin valtamerillä (Petersen, Petschatnikov et al., 2003). Kesällä 2001 tehtyjen vertailumittausten perusteella arvioitiin, että laitteen verkon tiheys ja rakenne vaikuttavat arvioituun planktonmäärään (Batten et al., 2003).

Laivan sisälle asennettavia läpivirtauslaitteita ollaan käytetty tutkimusaluksissa 1960-luvulta lähtien ja Itämerellä 1980-luvulta (Rantajärvi, 2003). Ensimmäisenä sellaista käyttivät Itämerellä Kahru ja Nõmmann vuosina 1985–1986 kasviplanktonin mittaamiseen (Kahru ja Nõmmann, 1990). Tällöin käytössä oli Estonian Marine Instituutin vuonna 1984 rakennetussa Arnold Veimer -laivassa (Ojaveer, 2001) oleva laitteisto, jossa oli hiukkaskokoa analysoiva laite sekä *in vivo* klorofylli-a -mittalaite (Seppälä, 2009).

Järjestelmää ei kuitenkaan käytetty Itämerellä kauppalaivoissa ennen vuosien 1990–91 pilottiprojektia. Projekti oli Suomen ja Viron Merentutkimuslaitosten yhteistyössä tehty projekti, jossa Helsingin ja Tallinnan välillä operoivaan matkustajalaivaan Georg Otsiin asennettiin läpivirtauslaitteisto joka mittasi mm. lämpötilaa, suolaisuutta ja klorofylli-a fluoresenssia (Rantajärvi, 2003; Seppälä, 2009). Varsinkin levien mittaamista pidettiin tärkeänä.

Vuonna 1992 pilottiprojektissa kehitetty automaattinen analysointilaitteisto

---

<sup>7</sup>Suolaisuutta ja lämpötilaa mittaava laite

asennettiin Merentutkimuslaitoksen toimesta Silja Linen Finnjet-alukselle, joka kulki Travemündestä Helsinkiin, sekä vastaava laitteisto Merenkurkun ylittävälle kaupapaiva Fennialle Kokkolan vesi- ja ympäristöpiirin, Pohjanmaan vesiensuojeluyhdistyksen sekä Vaasan vesi- ja ympäristöpiirin toimesta. Laitteistoon lisättiin automaattinen vesinäytteenottolaitteisto, jotta voitaisiin paremmin kontrolloida ja kalibroida automaattisia mittauksia (Rantajärvi, 2003). Finnjetin laitteisto oli toiminnassa 1992–2004, mutta reitti muuttui 1998. Fennian laitteisto oli toiminnassa 1992–95 (*Alg@line 20 years of Baltic Sea monitoring* 2013; Rantajärvi, 2003). Lisäksi Merentutkimuslaitoksen ja Krylov Shipbuilding Research Institutin (Pietari) yhteistyöprojektissa testattiin hieman erilaista laitetta Konstantin Simonov -laivalla, joka kulki Helsingin ja Pietarin välillä (Rantajärvi, 2003). Konstantinin laite oli toiminnassa 1992–95 (*Alg@line 20 years of Baltic Sea monitoring* 2013).

Alg@line -seurantahanke perustettiin vuonna 1993 seuraamaan ja raportoimaan laivojen mittaamaa dataa. Uutta järjestelmää pidettiin tarpeellisenä, koska data oli ennen tätä liian harvaa ekosysteemin nopeiden muutosten seuraamiseen. Kehitettyjä läpivirtaussysteemejä käytettiin leväkukintojen seuraamiseen ja vuonna 1994 seurannan avuksi otettiin myös satelliittidataa leväkukintojen laajuuden sekä pintalämpötilaan seuraamisessa (Rantajärvi, 2003). Samalla laitteistoa alettiin Suomessa kutsua Alg@lineksi. Alussa dataa jaettiin loppukäyttäjille eli Suomen, Ruotsin ja Saksan viranomaisille; HELCOM:lle; sekä Suomen medialle. Jakokanavana oli Merentutkimuslaitoksen (FIMR) AlgaFax -niminen faksipalvelu (Rantajärvi, 2003). Vuonna 1995 siirryttiin välittämään data internetin kautta kun Merentutkimuslaitos alkoi jakaa leväkukintadataa nettisivun välityksellä. Kesällä nettisivua päivitettiin viikoittain (Kaitala et al., 2014; Rantajärvi, 2003).

Vuonna 2002–05 järjestettiin EU:n FerryBox -projekti, jonka tarkoituksena oli kehittää ja optimoida läpivirtausjärjestelmiä. Laitteistoja alettiin projektin myötä kutsua FerryBoxeiksi. Mukana oli 11 eri organisaatiota ja 9 eri alusta ympäri Eu-

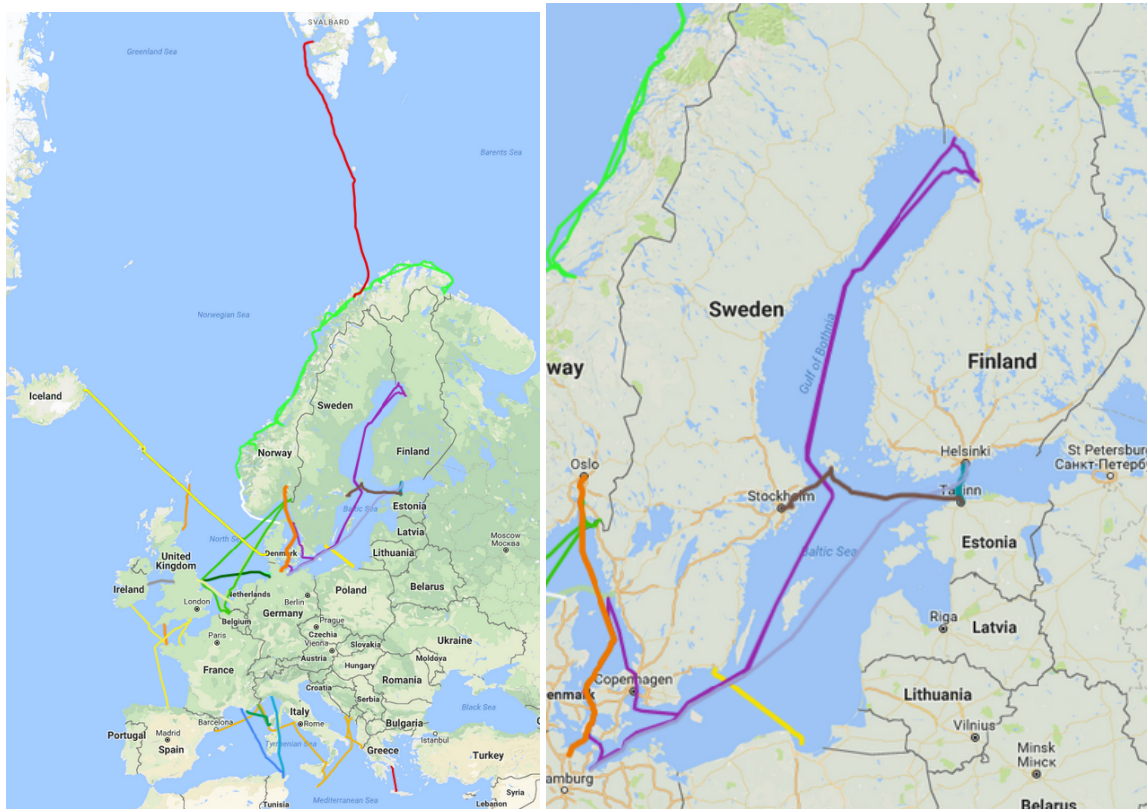


**Kuva 1.1:** Kartta FerryBox -projektissa käytetyistä laivareiteistä. Reitit otettu Petersen, Colijn et al. (2007) artikkelista

rooppaa (Petersen, 2014; kuva 1.1). Itämereltä mukana olivat Alg@linen laivareitit, eli laivat Helsingistä Tallinnaan sekä Helsingistä Travemünde. Kaikilla reiteillä mitattiin lämpötilaa, suolaisuutta, turbiditeettiä ja klorofylli-a fluoresenssia. Lisäksi joissain laivoissa mitattiin pH:ta, happea, ravinteita, sekä luokiteltiin levälajikkeita. Myös ADCP:n kiinnittämistä runkoon kokeiltiin (Petersen et al., 2007). Kaiken kaikkiaan projekti oli onnistunut ja loi yhteisen konseptin FerryBoxeille. Eri reitien data ja tulokset olivat kuitenkin pirstaloituneita eri instanssien ja järjestelmien välille, ja data oli vain osittain yleisesti saatavilla. Koko standardia ja varsinkin datan käsittelyä ja laadun varmennusta on siksi ollut tarpeen kehittää ja yhtenäistää.

Näitä asioita ollaan ajettu eteenpäin seuraavissa EU-projekteissa: MyOcean (2009–2012), JERICO (2011–2015) sekä Jerico-Next<sup>8</sup> (2015– edelleen käynnissä) (Petersen, 2014; Farcy, 2016; Farcy ja Durand, 2017).

### 1.1.2 SOOP:ien nykytilanne



**Kuva 1.2:** Kartta nykyisistä FerryBox -reiteistä koko Euroopasta (vasen) ja Itämereltä (oikea).

Violetti viiva kuvaa tässä tutkielmassa käytetyn M/V Transpaper -laivan reittiä.

Reitit saatu FerryBox Task Teamin sivuilta;

[https://www.ferrybox.org/routes\\_data/routes/index.php.en](https://www.ferrybox.org/routes_data/routes/index.php.en), siteerauspäivä 3.10.2018.

Nykyään FerryBoxeja on toiminnassa noin 30 kappaletta Euroopassa. Niistä 7 toimii Itämerellä (kuva 1.2) (FerryBox Task Team, Siteerauspäivä 1.6.2018).

FerryBox -dataa on Euroopassa käytetty eniten leväkukintojen seurantaan ja tutkimiseen. Esimerkiksi Groetsch et al. (2016) tutkimuksesta käy ilmi, että le-

<sup>8</sup>[www.jerico-fp7.eu](http://www.jerico-fp7.eu)

väkukinnat ovat heikentyneet mutta pidentyneet vuosina 2000–2014. Levätilannetta on mitattu sekä suoraan mm. levien fluoresenssia mittaamalla, että esimerkiksi  $\text{PCO}_2$ :n<sup>9</sup> kautta kuten Schneider et al. (2015) tutkimuksessaan. Myös muita kaasuja, kuten metaania on tutkittu (Gülzow et al., 2013).

Dataa on myös käytetty merimallien kehityksessä ja validoinnissa (Grayek et al., 2011), sekä Sørensen et al. (2017) apuna satelliittidatan validoinnissa. Satelliittidataa on käytetty yhdessä FerryBox -datan kanssa kattavampien tulosten saamiseksi jaksollisista tapahtumista (Łysiak-Pastuszek et al., 2012). FerryBoxilla mitattua dataa on myös verrattu tutkimusaluksella mitattuun dataan suolaisuuden, lämpötilan, klorofyllin ja hapen osalta, esimerkiksi (Karlson, Andersson et al., 2016) artikkelissa.

Leväkukintojen ja mallien lisäksi dataa on käytetty muiden ilmiöiden tutkimiseen kuten esimerkiksi (Kikas ja Lips, 2016) artikkelissa Suomenlahden kumpuamisesta. Myös ihmisten toiminnan vaikutusta ja kuormitusta meriin on tutkittu. Esimerkiksi Voynova et al. (2017) -artikkelissa käsiteltiin ilmastonmuutoksen aiheuttamien ääri-ilmiöiden vaikutuksia perehtymällä Elbe-joen 2013 tulvan biogeokemiallisiin vaikutuksiin, sekä Brumovský et al. (2015) tutkimus jossa vesinäytteistä mitattiin eri kemikaalien pitoisuuksia. Tutkimuksessa Pohjanmereltä löydettiin hyönteismyrkkyjä, lääkeaineita sekä keinotekoisia makeutusaineita. Mikromuovien aiheuttamat ongelmat ovat viime vuosina tulleet enemmän tietoisuuteen, ja nyt on kehitteillä järjestelmiä, jotka voisivat mitata mikromuovien määrää merissä. Esimerkki tällaisesta projektista on EU:n CLAIM<sup>10</sup>-projekti (Constantin et al., 2017; European Commission Infocentre, 2018, siteerauspäivä 12.12.2018).

FerryBoxia vastaavia läpivirtauslaitteistoja on käytetty myös Euroopan ulkopuolella. Esimerkiksi NOAA:lla<sup>11</sup> on tällä hetkellä CT -laitteet<sup>12</sup> 16 kauppa-aluksella (*Thermosalinograph* Siteerauspäivä 29.11.2018). Myös muita vastaavia laitteisto-

---

<sup>9</sup>hiilidioksidin osapaine

<sup>10</sup>“Clearing Litter by developing and Applying Innovative Methods in European seas”

<sup>11</sup>National Oceanic and Atmospheric Administration

<sup>12</sup>johtokykyä ja lämpötilaa mittaava laite

ja on ollut jonkin aikaa käytössä Kanadassa, USAssa, Australiassa (Lee et al., 2011), (Petersen, 2014) ja Japanissa (Harashima ja Kunugi, 2000). Kattavamman listan FerryBoxeista tehdyistä julkaisuista voi löytää FerryBox task teamin nettisivuilta <https://www.ferrybox.org/dissemination/publications/>. Kaiken kaikkiaan järjestelmä on erittäin monipuolinen ja datalla voi tehdä hyvin monimuotoista tutkimusta.

## **1.2 Pohjanlahden ja pohjoisen Itämeren hydrografia**

Tässä tutkielmassa keskitytään Itämerellä kulkevan M/V Transpaper -laivan FerryBox -data, josta käytetään Gotlannista pohjoiseen olevaa reitin osuutta (katso kappale 2.1.2). Alue kattaa Pohjanlahden sekä Gotlannin meren läntisen ja pohjoisen osan. Pohjanlahdesta Ahvenanmeri, Selkämeri ja Pohjanlahti ovat reitin varrella (kuva 1.3).

### **1.2.1 Vuodenaikaisvaihtelu**

Itämeren vesimassa on jakautunut kahteen kerrokseen, joiden välissä sijaitsee halokliini, eli suolaisuuden harppauskerros. Halokliini on Gotlannin merellä ja Selkämerellä 60–80 metrin syvyydellä ja Perämerellä noin 50–60 metrin syvyydellä (Bock, 1971; Leppärannan ja Myrbergin, 2009, mukaan). Pintakerros on yleensä hyvin sekoittunut tuulen sekä termohaliinisen konvektion ansiosta.

Vesi on talvella hyvin sekoittunut halokliiniin asti, minkä jälkeen touko–kesäkuussa pintakerroksen lämpenemisen ansiosta syntyy 15–30 metrin syvyydelle termokliini, eli lämpötilan harppauskerros. Pintakerros on usein tuulen sekoittama. Joista tuleva makea vesi ei sekoitu kesällä pintakerrosta syvemmälle, koska se on kevyempää. Niinpä pintakerros voi olla hieman muuta halokliinin yllä olevaa kerrosta



**Kuva 1.3:** Kartta pohjoisen Itämeren merialueista. Punainen katkoviiva kuvaa M/V Transpaperin reittiä.



vähäsuolaisempi, ja sen alle jää kylmempi talvivedeksi kutsuttu kerros. (Leppäranta ja Myrberg, 2009)

Pintakerros syvenee elo–syyskuussa jäähtymisestä johtuvan termokliinin heikkenemisen ja tuulen aiheuttaman sekoittumisen ansiosta. Vesi sekoittuu halokliiniin asti. Samalla myös pintakerroksen suolaisuus kasvaa hieman. Pintakerroksen maksimi- ja minimisuolaisuuden ero on yleensä noin 0,5 ‰ (Leppäranta ja Myrberg, 2009).

### **1.2.2 Vedenvaihto**

Itämeren pintavirtauksen pitkäaikaiskeskiarvo on heikosti syklonista (vastapäivään) coriolis -ilmiöstä sekä altain muodosta johtuen (Palmén, 1930). Niinpä läntisellä Gotlannin merellä virtaus on keskimäärin etelään ja pohjoisella Gotlannin merellä keskimäärin länteen. Gotlannin meri on kytköksissä Pohjanlahteen Ahvenanmeren ja Saaristomeren kautta (kuva 1.3). Ahvenanmeri on Ahvenanmaan ja Ruotsin väliin jäävä vesialue eli 59°50′–60°30′N. Ahvenanmeren ja Gotlanninmeren välinen kynnys, Ahvenanmaan kynnys on 70 m syvä. Saaristomeri, joka kattaa Ahvenanmaan ja Suomen mantereiden välisen saarialueen on matala allas, jonka keskisyvyys on vain 19 metriä. Sen takia suuri osa Pohjanlahden ja Varsinaisen Itämeren välisestä vedenvaihdosta tapahtuu kapean Ahvenanmeren kautta, vaikka Saaristomeren halki kulkeekin pari etelä-pohjoissuuntaista kanavaa, joiden syvyys on noin 30–40 metriä (Fonselius, 1996) ja joiden kautta osa pintavedenvaihdosta tapahtuu. Selkämeri on Ahvenanmaasta pohjoiseen ja Merenkurkusta etelään oleva vesialue, eli noin 60°30′N –63°30′N (kuva 1.3).

Virtaus Ahvenanmeren kautta on kaksikerroksista, jossa vähäsuolaisempi vesi virtaa pintakerroksessa ulos Pohjanlahdelta ja suolaisempi vesi virtaa sisään pohjakerroksessa. Pohjanlahdelle pohjakerroksessa sisään virtaava vesi on vähäsuolaisempaa kuin Itämeren pääaltaan syvävesi, altain välisten kynnysten sekä Ahve-

nanmerellä tapahtuvan sekoittumisen ansiosta, joten Pohjanlahden kerrostuneisuus ei ole yhtä vahva kuin Itämeren pääaltaalla (Voipio, 1981). Tästä johtuen Pohjanlahden halokliinin syvyys vaihtelee enemmän vuoden mittaan, ja saattaa kadotakin kokonaan joissain paikoin talvella. Ahvenanmereltä sisään virtaava vesi tulee kesällä pääosin Gotlannin mereltä 50–70 m syvyydeltä, mutta talvella kovat tuulet pakottavat Gotlanninmeren pintaveden Ahvenanmereen. Näin Selkämeren syvävesi koostuu suureksi osaksi Gotlanninmeren pintavedestä (Håkansson et al., 1996; Marmefelt ja Omstedt, 1993; Voipio, 1981).

Selkämeren ja Perämeren välillä sijaitsee Merenkurkuksi kutsuttu matalampi alue, jonka kynnyssyvyys on vain 25 m. Alue ei ole hydrografisesti itsenäinen allas vaan salmi, johon kuuluu Selkämeren pohjoisosa ja Perämeren eteläosa. Perämereen Selkämereltä päätyvä vesi on pääosin Selkämeren pintavettä, kuten ovat todenneet Marmefelt ja Omstedt (1993), Palosua (1973) ja Voipio (1981). Perämeri on Merenkurkusta pohjoiseen oleva Pohjanlahden osuus, eli se kattaa noin  $63^{\circ}30'$ – $66^{\circ}\text{N}$ . Talvella Perämereen Selkämerestä tuleva vesi päätyy Perämeren syvempiin kerroksiin suuremman suolaisuutensa ja konvektion ansiosta. Toisin kuin suuressa osassa Itämerä, jossa syvävesi vaihtuu vain Pohjanmereltä tulevien satunnaisten suolapulssien avulla, on Pohjanlahden syvävesi useammin vaihtuvaa.

### 1.2.3 Suolaisuus ja lämpötila

Tässä kappaleessa kuvatut suolaisuusarvot ovat Leppärannan ja Myrbergin (2009) kirjassaan kuvaamia Bock (1971):in arvoja, sekä joidenkin suolaisuuksien osalta kirjan kuvaajasta 3.19 luettuja arvoja. Lämpötila-arvot ovat Leppärannan ja Myrbergin kirjassaan kuvaamia Lentz (1971) arvoja. Pintalämpötilojen on todettu nousseen näiden mittauksen jälkeen (esimerkiksi Lehmann et al. (2011) mukaan vuosikeskiarvo on noussut noin  $0.5^{\circ}\text{C}$  vuosisadassa), mutta Lentzin arvot ovat edelleen yleisessä käytössä olevia niin sanottuja oppikirja-arvoja.

Syklonisen liikkeen ja jokivalunnan seurauksena altaiden itäpuolen pintavedet ovat keskimäärin lämpimämpiä ja suolaisempia kuin länsipuolella Leppärannan ja Myrbergin (2009) mukaan. Läntisellä ja Pohjoisella Gotlannin merellä virtaus on etelään ja pintasuolaisuus on 6,3–7,7 ‰. Vesi on vähäsuolaisempaa rannikon lähellä, jopa hieman alle 6 ‰. Leppäranta ja Myrberg (2009) kirjassa olevan kartan 3.19<sup>13</sup> mukaan suolaisuus on tosin Ahvenanmeren suulla, eli noin 59°50'N leveyspiirillä, 5,5 ‰ heinäkuussa, joka on vähemmän kuin heidän tekstissä antama arvo. Tämä johtunee siitä, että Ahvenanmeren etelärajalle on käytetty eri määritelmiä, ja heillä saattaa olla käytössä eri määritelmä kuin mitä tässä tutkielmassa on käytetty. Ahvenanmeren pintaveden suolaisuus on noin 5,25 ‰–6,25 ‰. Pintalämpötila Gotlannin meressä on kesällä (heinä–elokuu) keskimäärin 15–17°C, lokakuussa 10–12°C, tammikuussa 2–3°C ja huhtikuussa 1–2°C (Leppäranta ja Myrberg, 2009).

Selkämeren pintasuolaisuus vaihtelee 4,8 ‰ ja 6,0 ‰ välillä. Veden suolaisuus on matalinta pohjois- ja länsiosissa, johtuen Selkämeren syklonisesta kiertoliikkeestä. Merenkurkussa suolaisuus laskee noin 5 ‰:sta 3,5 ‰:een Leppäranta ja Myrberg (2009) kartan 3.19 mukaan. Perämeren suolaisuus on 2 ‰–3,8 ‰. Se on vielä matalampi lähellä rannikkoa, jokisuilla jopa lähellä nollaa. Pohjanlahti on ennen jäätynyt joka vuosi, ja vuodesta riippuen myös Selkämeri osittain tai kokonaan. Jäätä löytyy Pohjanlahdelta yleensä vielä maaliskuussa (Leppäranta ja Myrberg, 2009). Talvi 2014/2015 oli kuitenkin ensimmäinen vuosi jolloin Pohjanlahti ei todistetusti jäätynyt kokonaan, vaan sen sijaan lahden keskustaan jäi laaja sula alue (Uotila et al., 2015). Kesällä (heinä–elokuu) pintalämpötila on koko Pohjanlahdella keskimäärin 13–15°C ja lokakuussa Perämerellä 4–6°C sekä Selkämerellä 5–8°C (Leppäranta ja Myrberg, 2009).

---

<sup>13</sup>Bock (1971) karttojen perusteella uudelleenpiiretty kartta 3.19 sivulla 80

## 2. Materiaalit ja Metodit

Tässä kappaleessa käsitellään ensin FerryBoxia ja sen toimintaperiaatetta yleisellä tasolla, jonka jälkeen kuvaillaan tarkemmin laitteistoa jonka dataa on tutkielmassa käytetty. Lopuksi tarkastellaan vielä käytettyjä datasettejä ja statistisia kaavoja. Tässä tutkielmassa on FerryBox -datan lisäksi käytetty myös muita datasettejä, kuten CTD -dataa sekä reitin lähellä olevien pysyvien mittausasemien dataa. FerryBox -dataa on verrattu näihin sen laatua tutkittaessa.

Nykyään suositellaan käytettäväksi absoluuttista suolaisuutta (Teos10, 2015), mutta koska kyse on mittauksen vertailusta, ja kaikki data oli psu:na<sup>1</sup>, yksikkömuunnosta ei tässä tapauksessa tehty.

### 2.1 FerryBox

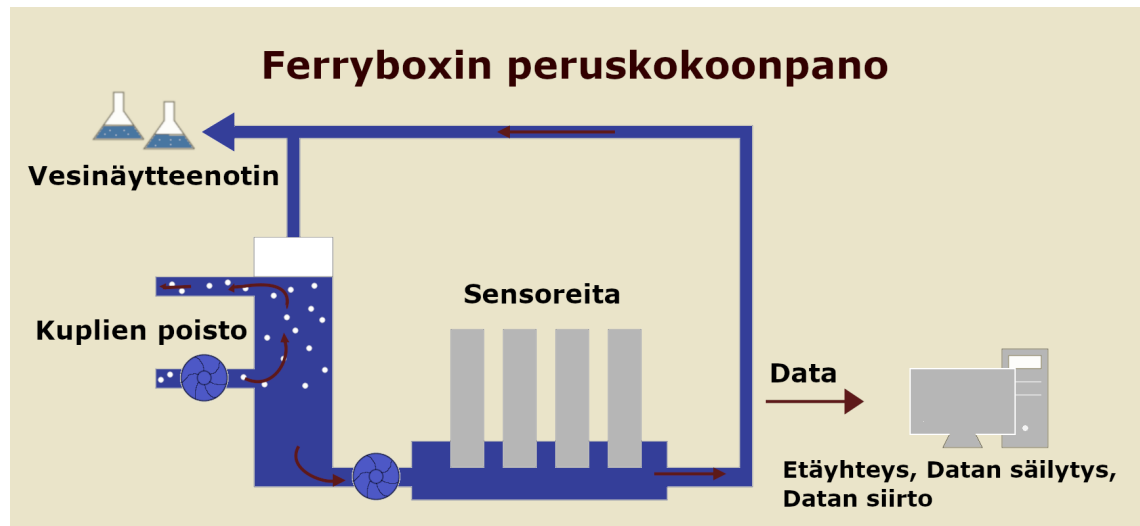
FerryBox -järjestelmillä on monia hyötyjä suhteessa perinteisiin in-situ -mittausmenetelmiin. Ne ovat kustannustehokkaita, koska esimerkiksi laivan kuluja ei tarvitse maksaa, eikä laivalla tarvita henkilöstöä mittauksen tekemiseen. Riittää että joku käy tarkistamassa ja huoltamassa laitteet tasaisin väliajoin laivan ollessa satamassa. Data saadaan melkein reaaliajassa ja sillä on hyvä ajallinen ja paikallinen resoluutio laivan reitillä. Alustassa (laivassa) ei myöskään ole energiarajoitteita. Haittapuoleena FerryBoxeissa on se että dataa saadaan vain pintakerroksesta ja ainoastaan laivan reiteiltä. Lisäksi mittaukset ovat sidoksissa vapaaehtoisiin laivayhtiöihin, joiden

---

<sup>1</sup>Practical Salinity Unit

omistaja tai reitti voi yhtäkkiä muuttua (Petersen, 2014).

### 2.1.1 Yleinen toimintaperiaate



**Kuva 2.1:** Kuva FerryBoxien perustoimintaperiaatteesta. Kuva luotu Petersenin, (2014) kuvan pohjalta.

Perusidea kaikissa FerryBoxeissa on sama, vaikka ne hiukan eroavat toisistaan. Laivassa on rungossa, yleensä 1–6 m syvyydessä (Petersen et al., 2007), sijaitseva veden sisäänotto, josta vesi pumpataan laitteistoon. Ennen varsinaisia sensoreita sijaitsee yleensä kuplanpoistojärjestelmä, joka poistaa ilmakuplia, jotka saattaisivat muuten haitata mittauslaitteiden toimintaa. Tässä kohtaa laitteistoa poistetaan yleensä myös karkeita hiukkasia, jotka saattaisivat muuten päästä matalissa vesissä laitteistoon ja tukkia putkia sekä mittalaitteita. Tästä vesi pumpataan seuraavaksi mittalaitteille ja lopulta ulos (kuva 2.1) (Petersen, Colijn et al., 2007; Petersen, 2014; *Measuring Principle of FerryBoxes* Siteerauspäivä 1.6.2018). Mittalaitteiden mittaama data kerätään tietokoneelle, johon se tallennetaan ja josta se lähetetään eteenpäin, viimeistään laivan käydessä seuraavan kerran satamassa.

Mittalaitteisiin kuuluvat lämpötilaa, suolaisuutta, turbiditeettia ja klorofyllin fluoresenssia mittaavat laitteet, sekä gps -vastaanotin sijainnin saamiseksi. Yleensä

sijaintidata otetaan laivan omasta gps:tä. Näiden lisäksi on yleensä automaattinen vesinäytteenottojärjestelmä, joka ottaa vesinäytteitä myöhempää laboratorioanalysointia varten. Näin pystytään seuraamaan laitteiden toimivuutta ja kalibroimaan niitä tarvittaessa. Edellä mainittujen lisäksi FerryBoxeissa voi olla muitakin laitteita, esimerkiksi: happi- ja  $p\text{CO}_2$  -mittalaitteet, laite levien luokitteluksi, sekä eri ravinteita mittaavia sensoreita. Useat laivat mittaavat myös meteorologisia suureita, kuten ilman lämpötilaa, ilmanpainetta ja säteilyä. Eroja on mittalaitteiston lisäksi automaation ja etäkontrollin määrässä sekä ”biofoulingin”, eli haitallisen pintakäsvuston muodostumisen laitteiden pinnoille, estomenetelmissä (Petersen, 2014).

### 2.1.2 Transpaperin FerryBox

Transpaper (nykyinen nimi Tavastland)<sup>2</sup> on vuonna 2006 rakennettu 191-metrinen rahtilaiva, joka kulkee pääosin reittiä Göteborg-Kemi-Oulu-Lyypekki-Göteborg (kuva 1.2). Laivalle asennettiin FerryBox -laitteisto vuonna 2009 SMHI:n<sup>3</sup> ja SYKE:n<sup>4</sup> toimesta. Transpaperin nopeus on noin 14–18 solmua, paitsi hitaampi esimerkiksi paksun jään aikaan. Mittaustiheys on noin 20 sekuntia, joka vastaa noin 150–200 metrin matkaa. Veden sisäänotto sijaitsee noin 3 m syvyydessä 25 metrin etäisyydellä keulasta. Laivan rahdista riippuen veden sisäottosyvyys vaihtelee ja on todellisuudessa 2,6–3,4 metrin välillä. Tarkka syvyysarvo ei kuitenkaan ole oleellinen, koska sisään pumpattava vesi on sekoittunutta laivan liikkeen vaikutuksesta, joten sisäänottovesi on sekoittunutta noin 0–10 metrin syvyydestä (Karlson, Andersson et al., 2016).

Laivaan asennettiin heti alussa, eli vuonna 2009, mittalaitteet, jotka mittaavat

---

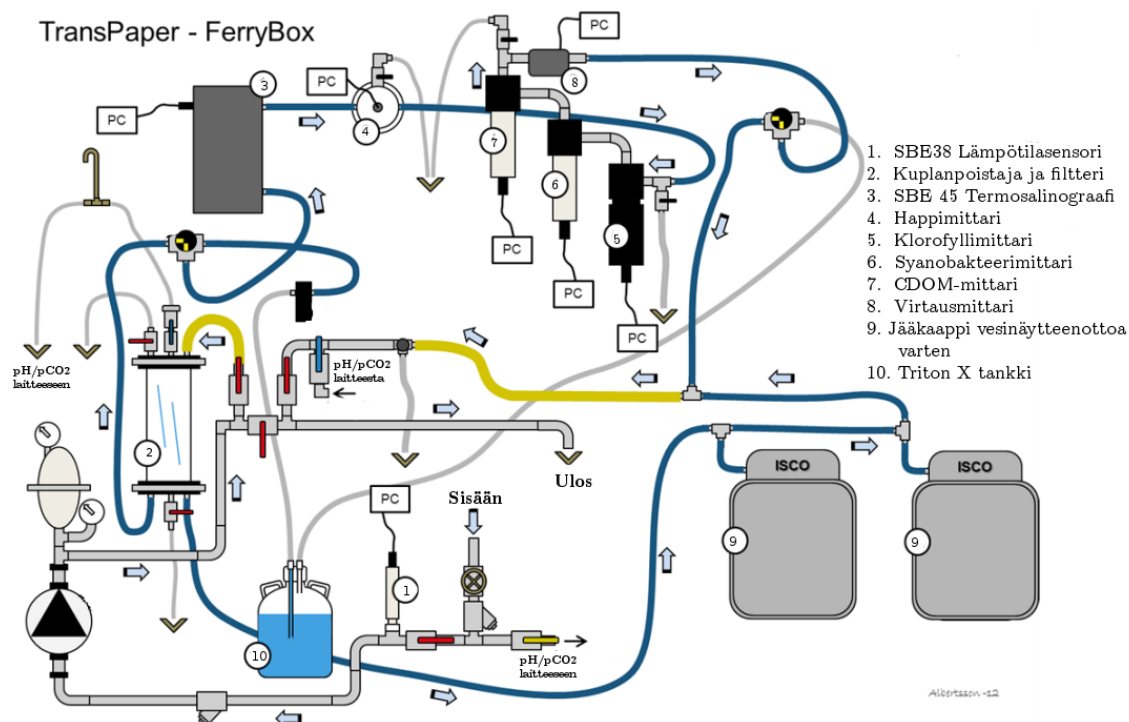
<sup>2</sup>Tässä tutkielmassa käytetään vanhaa nimeä, koska se on vielä yleisesti käytössä datan yhteydessä.

<sup>3</sup>Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut

<sup>4</sup>Suomen ympäristökeskus

lämpötilaa, sähkönjohtavuutta, klorofylli-a fluoresenssia, fykosyoniini<sup>5</sup>-fluoresenssia, turbiditeettia ja happea. Laivassa on myös automaattinen vesinäytteenottojärjestelmä, jonka näytteet analysoidaan laboratoriossa vertailuarvojen saamiseksi (Karlson, Kaitala et al., 2010). Nykyään mitataan myös CDOM:ia, pH:ta ja pCO<sub>2</sub>:ta. Ilmasta mitataan painetta, lämpötilaa, ja auringonsäteilyä (PAR sensorilla) (FerryBox Task

<sup>5</sup>Fykosyoniini: Pigmentti-proteiini jota esiintyy mm. punalevillä ja syanobakteereilla



**Kuva 2.2:** Kaavio M/V Transpaperin FerryBoxin rakenteesta. Kuva saatu SMHI:lta, teksti käännetty suomeksi.

Veden sisäänottopaikan lähellä mitataan tarkistuslämpötila Sea-Bird Electronicsin SBE38 lämpötilasensorilla (*SBE 38 Digital Oceanographic Thermometer* 2015) (1), jonka jälkeen vesi menee kuplanpoistajan (2) kautta yhtä putkea pitkin muihin mittalaitteisiin. Näistä ensimmäinen on SBE45 CT -laite (*SBE 45 MicroTSG Thermosalinograph* 2015) (3), jolla mitataan lämpötilaa ja johtokykyä, josta saadaan myös suolaisuus laskettua. Toinen putki menee kuplanpoistojärjestelmästä automaattiselle näytteenottolaitteelle (9), joka ottaa vertailumittaukset tietyissä koordinaateissa. Veden sisäänottopaikasta menee toinen putki pH ja pCO<sub>2</sub> mittalaitteisiin. Laivan ollessa satamassa laitteisto huuhdotaan automaattisesti 0,1% triton X-100 pesuaineliuoksella noin 30 min ajan (10).

Team, Siteerauspäivä 1.6.2018).

Systeemissä heti pumpun jälkeen on ensiksi lämpötilaa mittaava Sea-Bird Electronicsin SBE38 lämpötilasensori (*SBE 38 Digital Oceanographic Thermometer* 2015), jonka jälkeen vesi menee kuplanpoistojärjestelmälle ja siitä eteenpäin Sea-Bird Electronicsin SBE45 CT -laitteelle<sup>6</sup> (*SBE 45 MicroTSG Thermosalinograph* 2015). SBE45 mittaa suolaisuutta ja lämpötilaa, ja saatua lämpötila-arvoa verrataan SBE38:n saamiin lämpötila-arvoihin. Seuraavaksi vedestä mitataan happi, CDOM, Syanobakteerit ja Klorofylli-a, sekä putkien sisäinen virtausnopeus. Näiden lisäksi laitteisto ottaa vielä automatisoidusti vesinäytteet, joita säilytetään kylmässä. Toinen haara mittalaitteista menee pH ja pCO<sub>2</sub> -mittalaitteille. Järjestelmä puhdistetaan aina laivan ollessa satamassa 0,1% Triton X-100 pesuaineliuksella.

### 2.1.3 FerryBox -data

M/V Transpaperin FerryBox -datasta käytetään lämpötila- ja suolaisuusdataa Gotlannin ja Kemin väliltä. Data on ladattu Copernicus- Marine Environment Monitoring service (CMEMS) -palvelusta. Se on osa “Baltic Sea - In Situ Near Real Time Observations” -datasettiä (2018). Datasetissä suolaisuus on mitattu CT:llä<sup>7</sup> SBE45 ja lämpötila SBE38 lämpötilasensorilla (kappale 2.1.2). Datalle on tehty automaattinen laadunvarmennus, jossa on tehty seuraavat testit; “mahdoton päivämäärä”, “mahdoton sijainti”, “mahdoton nopeus”, “onko globaalien arvojen sisällä”, “onko alueellisten rajojen sisällä”, “piikki”, “gradientti”, “jumittunut arvo” sekä “pumppu ja pumpun historia”. Eli esimerkiksi jos virtausanturin mukaan putkissa ei kunnolla virtaa vesi, oletetaan että saatu data on myös huonoa. Lisäksi pumpun läheisyydessä olevaan SBE38 lämpötila-anturin lämpötilaa verrataan CT:n (SBE45) lämpötilaan. Näiden täytyy olla tarpeeksi lähellä toisiaan, jotta dataan voidaan luottaa.

---

<sup>6</sup>CT on johtokykyä ja lämpötilaa mittaava laite

<sup>7</sup>Johtokykyä ja lämpötilaa mittaava laite



Datalle on näiden testien perusteella annettu laatuluokitukset erikseen suolaisuudelle, lämpötilalle, ajalle ja paikalle (taulukko 2.1). Laatuleimoja on 0–9, mutta niistä datassa on käytetty vain laatuleimat; 0 luokittelemattomalle datalle, 1 hyvälle datalle, 4 huonolle datalle, sekä 9 puuttuvalle datalle (CMEMS, 2016). Datassa ei ole tarkemmin määritelty millä perusteella eri laatuluokituksiin on päädytty.

Hyväksi merkitylle datalle on laatudokumentissa annettu tarkkuus, jonka systeemi parhaimmillaan antaa eli 0,001–0,1°C lämpötilalle ja 0,003–0,2 psu suolaisuudelle (CMEMS, 2016). Oikea arvo riippuu laivassa olevasta sensorityypistä, mutta tätä ei ole datasetissä eritelty mittalaitteiden mukaan.

**Taulukko 2.1:** CMEMSin laadunvarmennuksen laatuleimat. 0 = ei laaduntarkastusta, 1 = hyvä data, 4 = huono data, 9 = puuttuva arvo, lähde (CMEMS, 2016).

Koodi	Selite	Kommentti
0	Laatuluokitusta ei tehty	-
1	Hyvä data	Kaikki reaaliaikaiset laaduntarkistukset läpäisty
2	Luultavasti hyvä data	Käytä tätä dataa varoen
3	Huono data joka on potentiaalisesti korjattavissa	Älä käytä tätä dataa ilman tieteellistä korjausta
4	Huono data	Vähintään yksi laadunvarmennustesti on epäonnistunut
5	Arvo muuttunut	Data on mahdollista palauttaa lähetysvirheen jälkeen
6	Ei Käytössä	-
7	Nimellinen arvo	-
8	Interpoloitu arvo	Puuttuva data, saattaa olla mahdollista interpoloida viereisistä datapisteistä
9	Puuttuva arvo	-

Dataa käsiteltäessä huomattiin epäilyttäviä mittauksia, joita automaattinen laadunvarmennus ei ollut poistanut. Esimerkiksi joissain havainnoissa joissa lämpötilan laatuleima on 4, on suolaisuuden laatuleimaksi annettu 1, vaikka senkin arvo oli joissain tilanteissa selvästi huono. Koettiin, että suolaisuuden laatuun ei voitu näissä tapauksissa luottaa, koska suolaisuus lasketaan sähkönjohtavuuden lisäksi lämpötilasta. Laskussa käytetään CT:n lämpötilaa, mutta sitä ei ole annettu, eikä sen luotettavuutta ole määritelty. Lisäksi laadunvarmennuksessa alun perin huonoksi merkittyjen pätkien kohdalla toisinaan myös edellinen/seuraava mittaus vaikutti

epäluotettavalta. Mukana oli myös pitempiä mittausjaksoja, joissa huonoiksi luokiteltujen mittausarvojen ympäriltä löytyi samankaltaisia arvoja, jotka tulkittiin myös epäluotettaviksi.

Datalle tehtiin uusi luokittelu, jossa pyrittiin huomioimaan alkuperäisessä laadunvarmennuksessa havaitut puutteet. Jokaiselle havainnolle määriteltiin yksi laatuluokka käyttäen samoja luokkakodeja kuin alkuperäisessä datassa. Lisäksi annettiin kirjainkoodi merkitsemään laatuluokan antoperustetta. Laatuluokituksessa huonoksi (laatuleima 4) määriteltiin ne havainnot, jonka alkuperäinen laadunvarmennus oli ainakin toisen suureen osalta merkinnyt huonoksi. Puuttuvaksi (laatuleima 9) määriteltiin mittauspiste jos ainakin yksi suureista oli merkitty puuttuvaksi, eikä mikään suure oltu merkitty huonoksi, ja epäilyttäväksi (laatuleima 3) ne joissa edellinen tai seuraava havainto puuttui, koska ne johtuivat oletettavasti jostain mittausvirheestä. Mittauksen oletettiin puuttuvan, jos kahden peräkkäisen havainnon mittausajankohtien välillä oli yli 63 sekuntia. Tämä sekuntimäärä määriteltiin katsomalla miten noin 20 sekunnin pituinen mittausväli vaihteli. Vain pienessä osassa havaintoja aikaero edelliseen havaintoon oli yli 63 sekuntia, ja tällöin aikaero oli yleensä huomattavasti pidempi, mutta vielä 60 sekuntin aikaeroja havaintojen välillä oli huomattavasti enemmän. Myös ne mittaukset jossa edellinen tai seuraava mittaus oli alkuperäisessä laatuluokituksessa merkitty huonoksi, merkittiin epäilyttäväksi.

Uuden automaattisen laadunvarmennuksen jälkeen dataan jäi joitain tarkemalla manuaalisella tarkastelulla epäilyttäväksi osoittautuneita havaintoja. Niistä on käsin poistettu ne ajanjaksot, jotka ovat osoittautuneet epäluotettavaksi datan analysointia tehtäessä (taulukko 2.2). Tällaisia mittauksia löytyi esimerkiksi talvelta kun havaittiin yhtäkkisiä yksittäisiä liian kylmiä lämpötilamittauksia, joissa arvot olivat jopa  $0,3^{\circ}\text{C}$  jäätymispisteen alapuolella. Lämpötilahavainnot näiden kohtien ympärillä olivat myös poikkeavia. Datasetissä oli myös kohtia joissa havainnot poikkeavat selvästi edellisistä ja seuraavista ja ovat sen lisäksi selvästi ajankohdan

maksimi tai minimilämpötilan ulkopuolella ilman järkevää syytä, kuten esimerkiksi poikkeavaa säätä. On luultavaa että dataan tämänkin jälkeen jäi yksittäisiä huonolaatuisia havaintoja, koska automaattinen laadunvarmennus ei löytänyt kaikkia huonoja havaintoja, ja datan määrän vuoksi sitä ei ole tarkoituksenmukaista tarkistaa kokonaan manuaalisesti. Tämän työn tarkoitukseen kokonaisuus on kuitenkin hyvä, koska suurimmat mittausvirheet on poistettu, koska yksittäisellä arvolla ei ole merkittävää vaikutusta tuloksiin.

**Taulukko 2.2:** Ylimääräisessä laadunvarmennuksessa käytetyt laatuleimat, sekä antoperusteen kirjainkoodit. Numerot seuraavat samaa kaavaa kuin datan alkuperäisessä laadunvarmennuksessa (kuva 2.1.

Laatuleima	Laatuleiman antoperuste	Selite
0	A	Laatuluokittelematon, suolaisuus ja lämpötila molemmat klassifioimattomia alkuperäisdatassa
	B	Laatuluokittelematon, suolaisuus klassifioimaton alkuperäisdatassa
	C	Laatuluokittelematon, lämpötila klassifioimaton alkuperäisdatassa
1	A	Hyvä data
	B	Hyvä data, mutta normaalin reitin ulkopuolella (yli 5km etäisyydellä)
2		Luultavasti hyvä data
3	A	Luultavasti huono data, piste juuri ennen/jälkeen huonon datapätkän
	B	Luultavasti huono data, piste juuri ennen/jälkeen hyppäyksen aikasarjassa
	C	Käsin merkattu Luultavasti huono data
4	A	Huono data, sekä suolaisuudella että lämpötilalla laatuluokka 4 alkuperäisdatassa
	B	Huono data, suolaisuudella laatuluokka 4 alkuperäisdatassa
	C	Huono data, lämpötilalla laatuluokka 4 alkuperäisdatassa
	D	Käsin poistettu selvästi huono arvo
9	A	Puuttuva arvo, sekä suolaisuus että lämpötila puuttuvat
	B	Puuttuva arvo, suolaisuusarvo puuttu, ja lämpötila ei ole huono
	C	Puuttuva arvo lämpötila puuttu, mutta suolaisuus ei ole huono

Näiden standardiluokitusten lisäksi käytettiin lisämääreitä laatuluokitukselle esim. tilanteissa joissa laiva ei kulkenut normaalilla reitillään jäälojen takia. Mitaukset jotka on tehty yli 5 km päässä annetulta reitiltä on luokiteltu koodilla 1B (1A jos hyvä mittaus ja reitillä). Tarkemmat tiedot annetuista uusista laatuluokista löytyvät taulukosta 2.2.

Mittausajanjaksolta 2009–2017 on 6,9 miljoonaa havaintoa, joista 3,7 miljoonaa oli tarkasteltavan alueen sisällä (58°N, 18°E–66°N, 24° 30'E). Näistä 2,8 miljoonaa eli 76,2 % oli laadultaan hyvää reitillä olevaa dataa, ja 0,5 miljoonaa eli 14,4

% on alkuperäisen laadunvarmennuksen huonoksi merkkäämaa dataa (taulukko 2.3 havaintojen määrä).

**Taulukko 2.3:** Mittausten kokonaismäärä vuosittain jaoteltuna laatuleimojen mukaan. 76,2% alueella olevista mittauksista ovat hyväksi merkittyä.

Vuosi	Data Yhteensä	Joista alueella 58°N, 18°E – 66°N, 24.5°E	0	1			3			4	9
				A	B	yhteensä	A – B	C	yhteensä	A – C	
2009	203124	89621	155	72693	4711	77404	2337	98	2435	9600	27
2010	1009799	508281	603	386857	24895	411752	9934	159	10093	85778	55
2011	920585	423962	475	223745	20700	244445	11149	154	11303	121093	46646
2012	1170426	561170	823	378433	26986	405419	11054	1055	12109	110651	32168
2013	1019518	480606	908	389848	67879	457727	2801	268	3069	18788	114
2014	1046168	486234	930	424712	32695	457407	3051	509	3560	24021	316
2015	798087	448880	539	395615	17618	413233	599	31	630	34452	26
2016	702293	393692	432	312598	12485	325083	1297	3164	4461	57727	5989
2017	742953	345293	18	263346	1082	264428	3311	0	3311	77536	0
Yhteensä	6870000	3737739	4883	2847847	209051	3056898	45533	5438	50971	539646	85341

## 2.2 CTD -data

**Taulukko 2.4:** Vertailumittausten sijainnit, mittaustyyppit, sekä mittausasemia ylläpitävät laitokset. Mittausten sijainnit voi myös nähdä kuvasta 3.1.

Mittaus	Sijainti	Mittausajanjakso	Parametrit	Asematyyppi	Laitos
CTD	57° 51'N, 17° 59'E – 65° 14'N, 23° 55'E	2009-2017	Lämpötila, Suolaisuus	-	-
Oulu Santapankki	65° 14'N, 24° 58'E	20015-2017	Lämpötila	pintalämpötilapoiju	IL
Perämeren aaltopoiju	54° 41'N, 23° 14'E	2012-2014, 2016-2017	Lämpötila	aaltopoiju	IL
Svenska Högarna	59° 26'N, 19° 30'E	2009-2017	Lämpötila	vesilämpötilaasema	SMHI
Huvudskär Ost	58° 56'N, 19° 10'E	2011-2013, 2015-2017	Lämpötila, Suolaisuus	meripoiju	SMHI
Knolls Grund	57° 31'N, 17° 37'E	2012-2017	Lämpötila	aaltopoiju	SMHI

CTD -data on saatu kahdesta eri lähteestä. Suuri osa käytetystä datasta on ICES:in<sup>8</sup> “CTD and Bottle” -datasetistä (ICES, 2018). Datasetissä mittaukset olivat yleisesti standardisyvyyksiltä eli pinnan lähellä 1, 5 ja 10 m syvyyksiltä. Näissä tilanteissa käytettiin 5 m syvyydellä tehtyä mittausta. Joitain mittauksia löytyi myös tiheämmällä vertikaaliresoluutioilla, näistä pisteistä otettiin 3 m syvyyttä lähinnä olevat mittaukset. ICES:in datasetin lisäksi saatiin myös Aranda -tutkimusalueella

<sup>8</sup>“International Council for the Exploration of the Sea”

mitattua Ilmatieteenlaitoksen CTD -dataa sellaisista mittauskampanjoista jotka eivät olleet ICES:in tietokannassa. Näistä käytettiin 3 m syvyydellä olevat havainnot.

## 2.3 Pysyvät mittausasemat

Kattavamman vertailudatan saamiseksi hyödynnettiin CTD -datan lisäksi dataa Transpaperin reitin lähellä olevilta kiinteiltä mittausasemilta (taulukko 4.4). Saatatavat parametrit vaihtelivat ja tietoa suolaisuudesta saatiin CTD -mittausten lisäksi ainoastaan Huvudskär Ostin meripoijulta.

Ilmatieteenlaitoksen poijujen datat on saatu Ilmatieteenlaitoksen sisäisen havaintotietokannan kautta, ja SMHI:n datat on ladattu heidän avoimen datan portaalista (SMHI Öppna data, 2018). SMHI:n mittausasemille oli tehty automaattinen laaduntarkistus. Näistä käytettiin vain havainnot, joiden laatuleima oli hyvä.

Osa mittausasemista, ainakin Suomen ylläpitämät Oulu Santapankki, ja Perämeren aaltopoijut poistetaan jäätalven ajaksi, joten näiltä asemilta ei ole dataa saatavilla talvella.

## 2.4 Vertailumittausten statistiikasta

Verrattaessa FerryBox -dataa muihin mittauksiin laskettiin absoluuttisen erotuksen keskiarvo MD (yhtälö 2.1), suhteellisen erotuksen keskiarvo RMD (yhtälö 2.2) sekä determinaatikerroin  $R^2$  (yhtälö 2.3). Kaavoissa  $y_i$  on FerryBox -mittaus,  $x_i$  on vertailupisteen mittaus,  $n$  on mittausten määrä ja  $\bar{y}$  (yhtälö 2.4) on FerryBox mittausten keskiarvo.

Absoluuttisen erotuksen keskiarvo kuvaa eri havaintojen välistä eroa. Eli kuinka paljon keskimäärin FerryBoxilla mitattu arvo eroaa vertailupisteen arvosta. Suhteellisen erotuksen keskiarvo on lähes sama, mutta skaalattuna vertausmittauksen kanssa, jottei eri mittausten kokoeroa otettaisiin huomioon, vaan suhteellinen ero

saataisiin selville. Tämä on hyvä verrattaessa mittauksia joilla on sekä isoja että pieniä arvoja (esim. lämpötila). Determinaatiokerroin eli selitysaste  $R^2$  kertoo miten hyvin FerryBox data korreloi vertausmittaustensa kanssa. Absoluuttisen ja suhteellisen erotuksen keskiarvossa pienempi luku on parempi. Determinaatiokertoimessa, joka on 0 ja 1 välillä, mahdollisimman suuri luku on hyvä datan laadun kannalta.

$$MD = \frac{1}{n} \sum |y_i - x_i| \quad (2.1)$$

$$RMD = \frac{1}{n} \sum \left( \frac{|y_i - x_i|}{|x_i|} \right) \quad (2.2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum (y_i - x_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i \quad (2.4)$$

## 3. Tulokset ja Keskustelu

### 3.1 Vertailu muihin datasetteihin

Ennen suolaisuuden ja lämpötilan analysointia verrattiin M/V Transpaper -laivan FerryBoxin mittauksia laivan läheltä mitattuihin CTD -mittauksiin sekä reitin lähellä olevien pysyvien mittausasemien aikasarjoihin. Tämä tehtiin, jotta saataisiin kuva siitä, miten hyvin FerryBoxin mittaukset vastaavat perinteisiä mittauksia ja ovatko ne verrattavissa keskenään. Haluttiin myös tietää, miten luotettavalta data vaikuttaa.

#### 3.1.1 CTD -data

CTD ja FerryBox -dataa verrattiin etsimällä toisiaan mahdollisimman lähellä ajallisesti ja alueellisesti olevat havainnot. Vertailu tehtiin koko 2009–2017 ajanjakson laatutarkastetulle FerryBox -datalle. Datasta käytettiin myös keskimääräisen reitin ulkopuolella olevaa osuutta, koska vertailupisteitä oli vähän. Tarkastelussa otettiin huomioon ne mittaukset joille löytyi vastine korkeintaan 20 km ja 3 päivän etäisyyksiltä. Mittausten välinen aikaero muunnettiin etäisyydeksi ja summattiin mittausten väliseen etäisyyteen. Konversiossa 1 päivä vastasi 3 kilometria. Näin saatua apumuuttujaa, havainnon kokonaisetäisyyttä, käytettiin laivan reittiä lähimmän mittausparin löytämiseksi. Apumuuttujaa tarvittiin, jotta CTD:n mittausajankohdat eivät eroaisi liikaa FerryBox:n ajankohdista. Myös muita aika/etäisyys

-konversioarvoja kokeiltiin, mutta niillä ei ollut merkittävää vaikutusta tuloksiin, koska vaikka eri konversioarvoilla valittu FerryBox -havainto saattoi muuttua pari havaintoa aikaisemmaksi tai myöhemmäksi, läheisten havaointojen arvot eivät merkittävästi eronneet toisistaan.

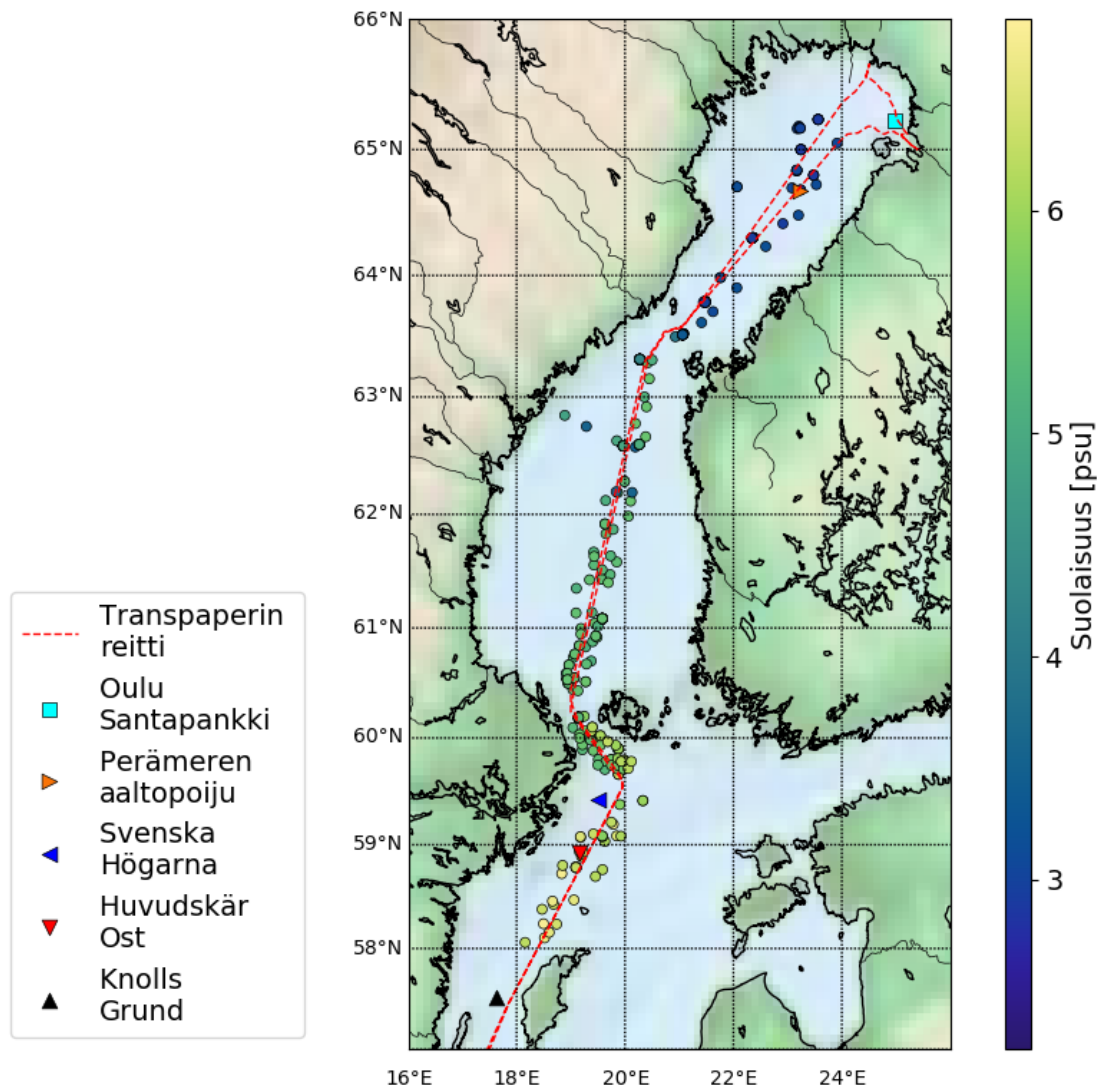
Joissain tilanteissa useampi CTD -havainto oli lähellä samaa FerryBox -havaintoa. Tällöin otettiin lähimpänä oleva piste. Joitain maksimietäisyyden sisällä olevia pisteitä hylättiin, koska niiden sijainnit eivät tarkemmassa tarkastelussa vastanneet hydrografisesti toisiaan, esimerkiksi jommankumman pisteen lähellä olevasta joki-suusta johtuen. Tässä haluttiin nimenomaan verrata hydrografisesti toisiaan vastaavia mittauspisteitä, jotta voitaisiin verrata mittausmenetelmiä keskenään.

Löydettyjä pistepareja on yhteensä 448 kappaletta, joista suuri osa sijaitsee Ahvenanmaan lähistöllä (kuva 3.1). Alueellisen vaihtelun lisäksi havainnoissa näkyy myös ajallista vaihtelua esimerkiksi Selkämeren pohjoisosissa ja Ahvenanmeren alueella. Tämä johtuu lähinnä mittauksen vuodenaikaisvaihtelusta.

CTD -datasta on käytetty 2–5 m syvyydeltä lähinnä 3 metriä olevat havainnot (luku 2.2) ja FerryBoxin havainnot ovat noin 3 metrin syvyydeltä (luku 2.1.3). CTD mittauksen suolaisuus oli 2,17 ja 7,01 psu:n välillä ja lämpötila  $-0,24^{\circ}\text{C}$  ja  $21,72^{\circ}\text{C}$  asteen välillä. Näitä vastaavien FerryBox -mittauksen arvot olivat 2,11–7,01 psu suolaisuudelle ja  $-0,17$ – $23,16^{\circ}\text{C}$  lämpötilalle. Valtaosa mitatuista havaintopareista vastaa toisiaan (kuvat 3.2, 3.3).

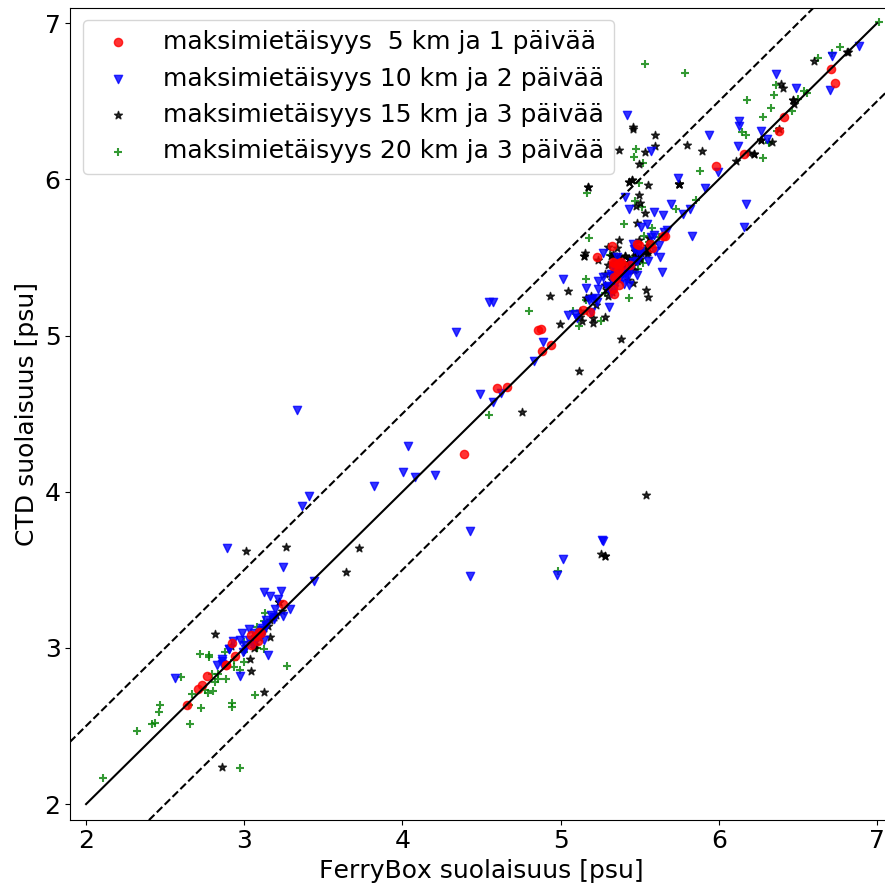
Suolaisuuden osalta (kuva 3.2) varsinkin etäisyydeltään lähellä toisiaan olevien havaintojen arvot ovat hyvin samankaltaisia. Hajonta kasvaa havaintojen välisen etäisyyden kasvaessa. Joitain isompia eroja kuitenkin huomattiin. Esimerkiksi Ahvenanmerellä ja Selkämerellä aikavälillä 27.9.2013–05.10.2013 mitatut Arandan CTD suolaisuusarvot erosivat FerryBoxin mittaamista arvoista huomattavasti, noin 1,4–1,7 psu (CTD 3,46–3,98 psu ja FerryBox 4,97–5,42 psu). Mittauksilla on tosin suuri etäisyys toisistaan, ainoa alle vuorokauden aikaeron (11 h) havaintopari





**Kuva 3.1:** CTD -mittausten, joille löytyi läheinen FerryBox -mittaus, sekä kiinteiden mittausasemien sijainnit. CTD -mittausten pisteiden väri kuvaa pisteessä viimeisimpänä mitattua suolaisuutta. Analyysissa käytettiin myös laivan oletusreitit, eli kartalla punaisen katkoviivan, ulkopuolella olevia FerryBox -mittauksia, joten jotkut havainnot ovat kauempana laivan reitistä.

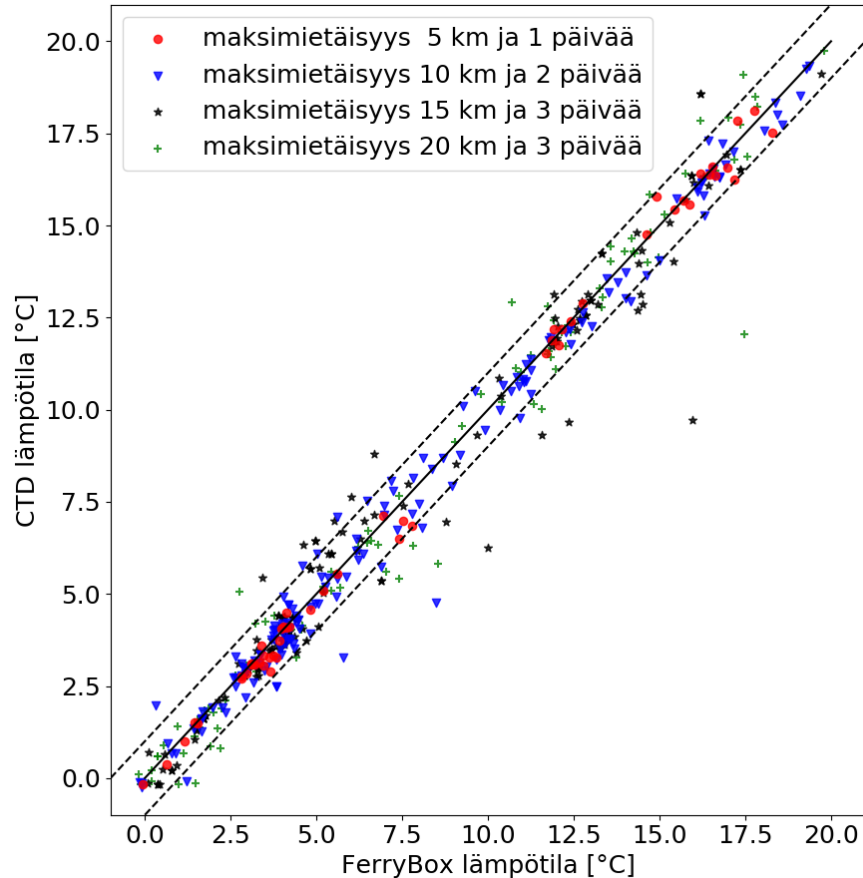
on 16 km päässä toisistaan, ja niillä havaintopareilla joilla etäisyys on alle 10 km on 35–60 h aikaeroa. Tarkaa syytä eroavaisuuksille ei pystytä kuitenkaan olemassa olevan datan puitteissa selvittämään. Myös esimerkiksi Merenkurkussa, jossa suolaisuus muuttuu jyrkästi pohjois/etelä -suunnassa oli joidenkin havaintoparien välillä huomattavia eroja. Näistä suurin on havaintopari jossa CTD suolaisuus 3,79 psu



**Kuva 3.2:** CTD- ja FerryBox -mittausten suolaisuus. Havainnot on jaettu 4 eri kategoriaan etäisyyden ja aikaeron mukaan. Toisiaan lähellä olevat havaintoparit vastaavat paremmin toisiaan. Katkoviivan sisällä olevien pisteiden ero on alle 0,5 psu. Yhtenäinen viiva kuvaa 1:1 suhdetta.

ja FerryBoxin suolaisuus 5,27 psu. Näiden havaintojen välinen etäisyys on 7 km ja aikaero 19 h. Merenkurkun havaintoparien eroavaisuudet johtunee Merenkurkun suolaisuusgradientista.

Myös lämpötilan osalta vastaavuus on hyvä (kuva 3.3). Jotkut mittaukset eroavat tosin hieman enemmän, jopa useamman asteen. Tämä ei kuitenkaan ole odotamatonta koska lämpötila vaihtelee nopeammin ja enemmän kuin suolaisuus, varsinkin kesällä, esimerkiksi tuulen aiheuttaman sekoittumisen sekä varsinkin rannikon lähellä kumpuamisen tai painumisen vaikutuksesta. Kumpuaminen voi vaikuttaa merkittävästi myös suolaisuuteen jos pintaveden ja syväveden suolaisuudessa on



**Kuva 3.3:** CTD- ja FerryBox -mittausten lämpötila. Pisteiden värit kuvaavat niiden maksimietäisyyttä toisistaan. Havainnot jaettiin etäisyyden ja aikaeron mukaan neljään eri kategoriaan. Lähempänä toisiaan olevat havainnot vastaavat paremmin toisiaan. Katkoviivan sisällä olevien pisteiden ero on alle 1°C. Yhtenäinen viiva kuvaa 1:1 suhdetta.

merkittäviä eroja.

Yksi esimerkki suurista lämpötilaeroista Ferryboxin ja CTD:n välillä on vuodelta 2014 (28.8–31.8), kun FerryBox mittasi 15,95°C (31.8) ja CTD 9,73°C (28.8) Selkämerellä. Näiden havaintojen välillä oli 9,7 km etäisyys ja 2 päivän ja 21 tunnin aikaero. Alueella oli 26.8. myrskytuuli 20 m/s. Kova tuuli jatkui, 28.8. tuulennopeus oli vielä 12 m/s. Tarkasteltaessa muita samoihin aikoihin mitattuja havaintoja nähdään, että sekä CTD:n että Selkämeren ja Perämeren aaltopoiijujen lämpötila oli 15°C molemmiin puolin. Lähempänä rantaa oleva poikkeava 9,73°C CTD -havainto

on mitä todennäköisimmin mitannut kumpuamisen seurauksena muuta Selkämerta kylmempää vettä. Suolaisuudessa ei näy tässä kohtaa kuitenkaan suurta eroa.

**Taulukko 3.1:** CTD ja FerryBox -mittausparien suolaisuuden ja lämpötilan keskimääräinen absoluuttinen ja suhteellinen erotus sekä determinaatiokerroin eri etäisyyksiltä. Jokaiseen annettuun etäisyyteen kuuluvat kaikki sen etäisyyden sisällä olevat havainnot.

Etäisyys (km)	Aikaero (päivä)	Mittaus- pisteiden lukumäärä	Suolaisuus suhteellinen ero	Suolaisuus absoluuttinen erotus [psu]	R <sup>2</sup> suolaisuus	Lämpötila suhteellinen ero	Lämpötila absoluuttinen ero °C	R <sup>2</sup> lämpötila
2	0,5	12	0,0082	0,0388	0,998	0,0321	0,1875	0,99845
2	1	27	0,0109	0,0521	0,9947	0,045	0,2944	0,9952
2	2	53	0,0125	0,0642	0,9931	0,0711	0,3551	0,9907
5	1	54	0,0118	0,0586	0,9951	0,0745	0,301	0,9927
5	2	119	0,0171	0,0789	0,98	0,079	0,3367	0,9906
10	1	102	0,0277	0,124	0,945	0,2296	0,388	0,987
10	2	212	0,0323	0,1416	0,9353	0,1566	0,395	0,987
15	2	274	0,035	0,16	0,921	0,152	0,398	0,986
15	3	337	0,0367	0,1676	0,915	0,1747	0,4598	0,9788
20	3	448	0,037	0,1667	0,931	0,218	0,4911	0,9777

Kaiken kaikkiaan FerryBox -havainnot vastaavat hyvin CTD -havaintoja. Havainnoilla, jotka ovat korkeintaan 2 km ja puolen päivän etäisyydellä toisistaan suolaisuuden suhteellinen erotus on 0,8 %, ja absoluuttinen erotus 0,039 psu (taulukko 3.1). Lämpötilalle saatu suhteellinen erotus on 3,2 % ja absoluuttinen erotus 0,19°C, joka ei ole yhtä tarkka, mutta lämpötila vaihtelee kuitenkin enemmän paikan ja ajan myötä, kuin suolaisuus. Täytyy myös ottaa huomioon että mittaukset eivät ole täysin samalta paikalta ja syvyydeltä, ja että tällä maksimietäisyydellä löytyy vain 12 havaintoparia koko 9 vuoden ajanjaksolla, mikä heikentää aineiston luotettavuutta tältä osin. Kuitenkin myös jopa 20 km ja 3 päivän etäisyydellä, jolloin havaintopareja on jo 448, pysyvät absoluuttiset erotukset kohtuullisen matalalla, 0,167 psu suolaisuudelle ja 0,491°C lämpötilalle.

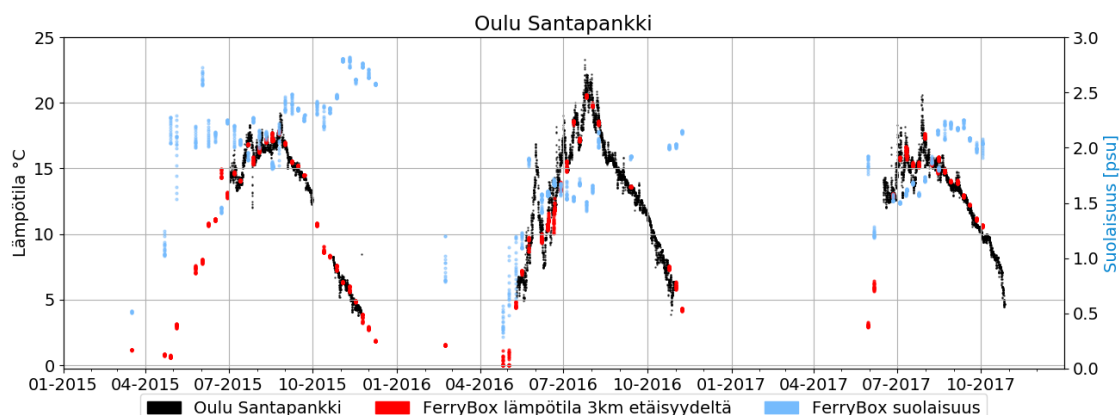
Korrelaatio on suurta sekä suolaisuudelle että lämpötilalle 2 km ja puolen päivän etäisyydellä ( $R^2 > 0,99$ ), ja myös 3 päivän ja 20 km etäisyydellä ( $R^2 > 0,93$  suolaisuudelle ja  $R^2 > 0,97$  lämpötilalle). Tämä lisää edelleen datan luotettavuutta.

### 3.1.2 Vertaus kiinteisiin mittausasemiin

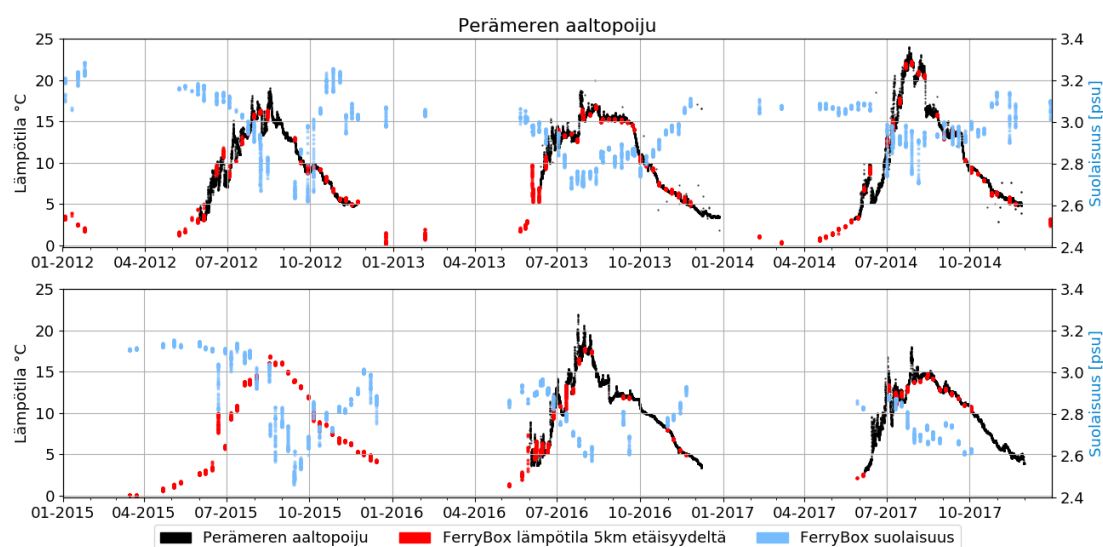
FerryBox -dataa verrattiin myös reitin lähistöllä oleviin kiinteisiin havaintoasemiin. Mukaan analyysiin valittiin asemat jotka olivat alle 20 km etäisyydellä laivan reitistä. Näitä löytyi 6 kappaletta (kuva 3.1). Analyysiin käytettiin ylimääräisellä laadunvarmennuksella tarkistettua dataa (luku 2.1.3) kaikkien asemien paitsi Knolls Grundin osalta, joka sijaitsi hieman tarkastelualueen eteläpuolella alueella, jolle laadunvarmennusta ei oltu tehty. Asemaa haluttiin kuitenkin käyttää analyysissä, koska laivan reitin lähellä oli niin vähän mittausasemia ja Knolls Grund on suhteellisen lähellä tarkasteltavaa aluetta. Knolls Grundin vertailussa käytettiin mittauksia, jotka olivat alkuperäisen CMEMS:n laaduntarkistuksen mukaan luotettavia.

Kaikkien asemien paitsi Svenka Högarna kohdalla FerryBox -lämpötila vastasi hyvin pysyvien mittausasemien dataa paria yksittäistä mittausta lukuun ottamatta (kuva 3.4). Svenska Högarnakaan (kuva 3.4d) ei eroa paljon mittausajan alussa eli 2009–2014, vaan vasta vuodesta 2015 eteenpäin. Vastaavaa vuodesta 2015 eteenpäin olevaa mittauksen eron kasvua ei kuitenkaan näy missään toisessa asemassa, joten eroavuuden kasvun oletetaan johtuvan jostain muutoksesta aseman laitteistossa tai mittaustarkkuudessa, tai aseman sijainnin muutoksesta, sen sijaan että FerryBoxin -datan laatu olisi heikennyt. Mittausasemalla käytetyistä laitteista ei ole tarkempaa tietoa saatavilla.

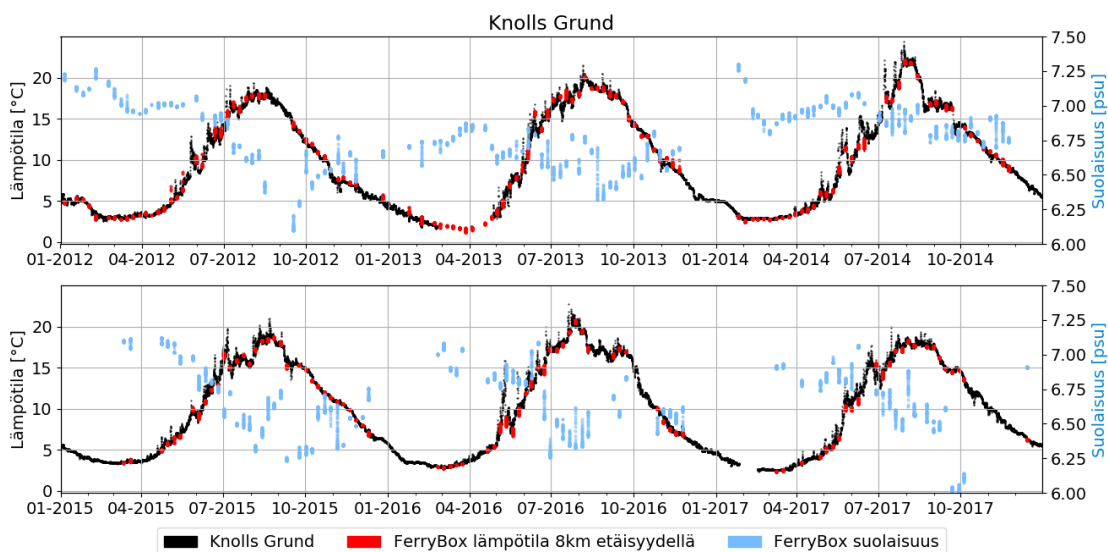
FerryBox -lämpötila näyttää muilta osin vastaavan hyvin kiinteiden asemien mittauksia, sekä yleisen vuodenaikaisvaihtelun, että lyhytaikaisten vaihteluiden osalta. Esimerkiksi vuoden 2016 kesäkuun alkupuolella pohjoisessa tapahtuva lämpötilapiikki näkyy sekä Santapankin poijussa (kuva 3.4a) että Perämeren poijussa (kuva 3.4b). Näiden lisäksi myös FerryBox on samaan aikaan mitannut kohonneita lämpötiloja. Ihan havaintopojujen mittaaman lämpötilapiikin ääriarvoja FerryBox ei ole poijujen lähellä havainnut, koska laiva ei ollut alueella juuri siltä hetkeltä kun pysyvät asemat ovat mitanneet nämä maksimilämpötilat.



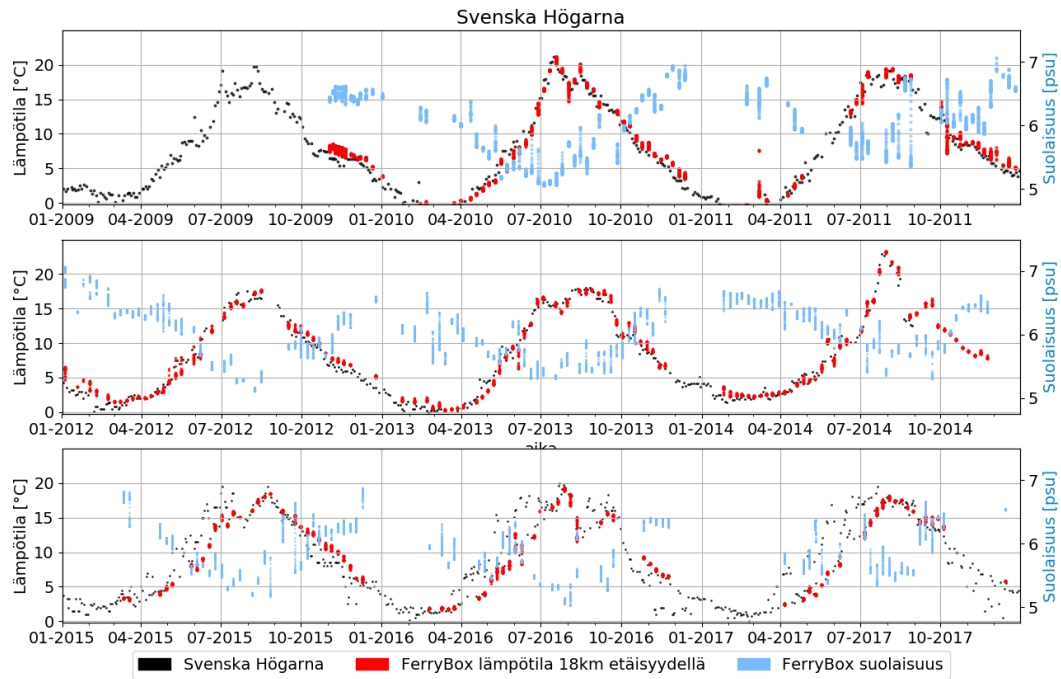
(a) Ferrybox lämpötila- ja suolaisuusmittaukset verrattuna Oulu Santapankki pintalämpötilapojun mittauksiin 2015–2017



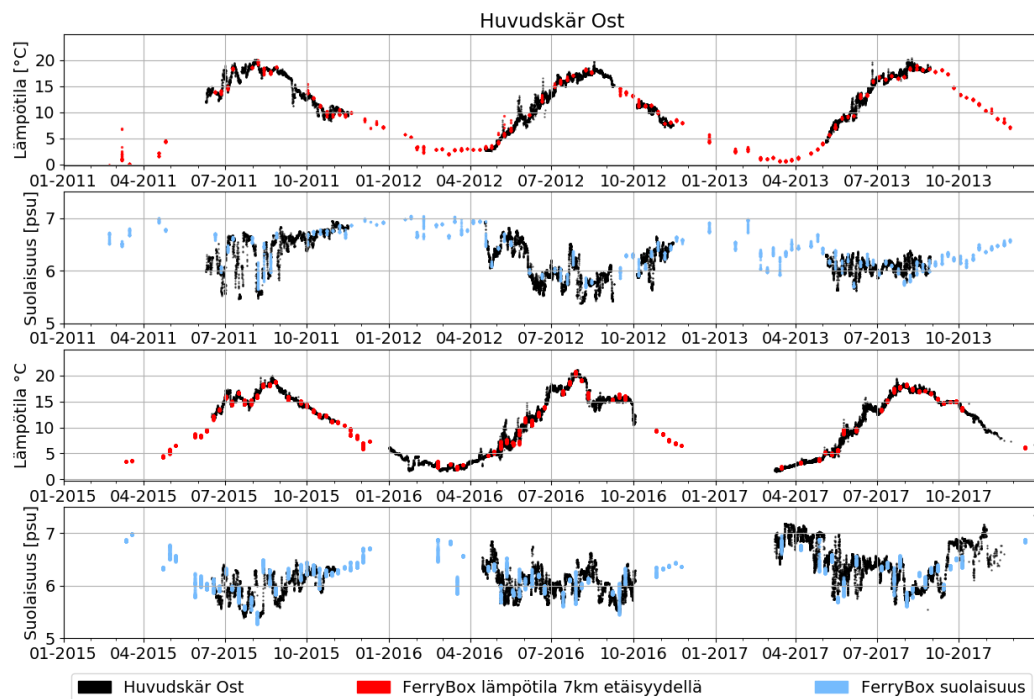
(b) Ferrybox lämpötila- ja suolaisuusmittaukset verrattuna Perämeren aaltopoijuun 2012–2016



(c) Ferrybox lämpötila- ja suolaisuusmittaukset verrattuna Knolls Grund mittausaseman mittauksiin 2012–2017

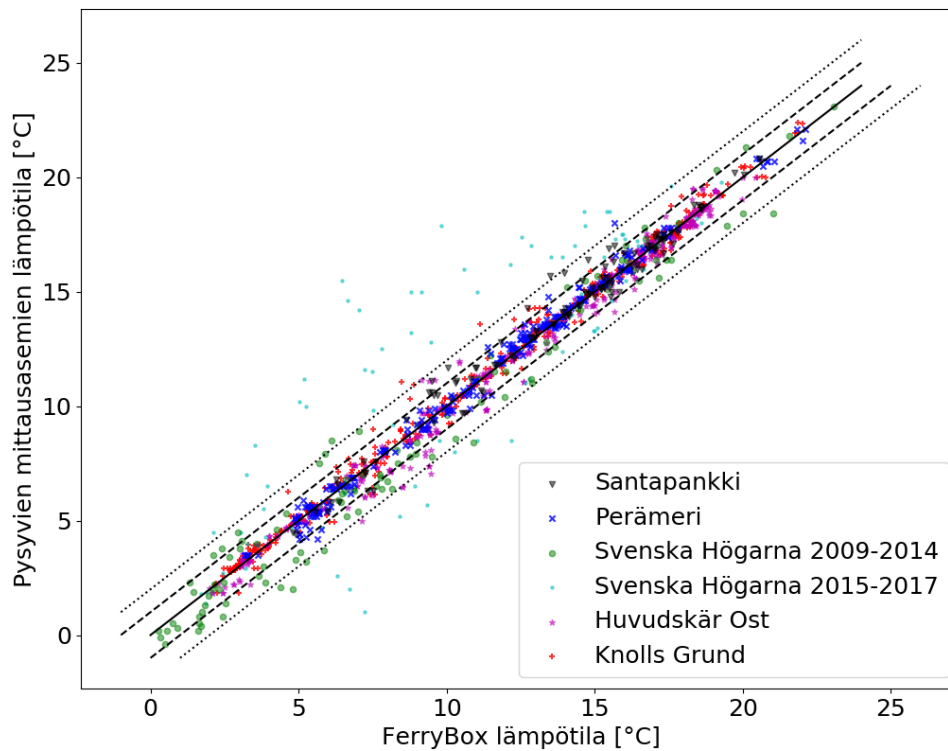


(d) Ferrybox lämpötila- ja suolaisuusmittaukset verrattuna Svenska Högarna mittausaseman mittauksiin 2009–2017



(e) Ferrybox lämpötila- ja suolaisuusmittaukset verrattuna Huvudskär Ost mittausaseman mittauksiin 2011–2017

**Kuva 3.4:** Kiinteiden mittausasemien mittaukset sekä FerryBox -mittaukset verrattuna keskenään. Lämpötila näyttää seuraavan varsin hyvin poijujen mittaamaa lämpötilaa paria poikkeusta lukuun ottamatta, jollei lasketa Svenska Högarnissa vuodesta 2015 eteenpäin mitattuja lämpötiloja. Myös suolaisuuden osalta FerryBoxin -data näyttää seuraavan hyvin Huvudskär Ostissa mitatun suolaisuuden vaihteluita.



**Kuva 3.5:** Kaikki FerryBoxin ja mittausasemien väliset mittausparien lämpötila. Katkoviivan sisällä olevien havaintoparien erotus on alle  $1^{\circ}\text{C}$  ja pisteviivan alle  $2^{\circ}\text{C}$ . Vain noin tusin mittauspareista erosi toisistaan yli  $2^{\circ}\text{C}$  jollei lasketa Svenska Högarna -aseman 2015 vuoden jälkeen mitattamia arvoja.

Yleisesti ottaen poijujen ja FerryBoxin mittausten välillä on pääosin alle  $1^{\circ}\text{C}$  ero. Suurimmillaan ero on noin  $2^{\circ}\text{C}$  (kuva 3.5), vain noin tusina pistepareista eroaa yli  $2^{\circ}\text{C}$ , jollei oteta huomioon Svenska Högarna 2015–2017 mittauksia.

Mittauspareille laskettiin vastaavaa tilastotietoa kuin CTD -mittauksiin verrattaessa (taulukko 3.2). Kaikilla lämpötila-asemilla, paitsi Svenska Högarnilla (2015–2017), korrelaatio on vahva ( $R^2 > 0,95$ ). Huomataan myös, että keskimääräinen erotus mittausten välillä on pienin Perämeren aaltopojun ja Knolls Grundin kohdalla ja suurinta Svenska Högarnan kohdalla, myös ennen vuotta 2015. Erot näiden havaintojen välillä oletetaan johtuvan mittausten välisistä etäisyyksistä, sekä alueen



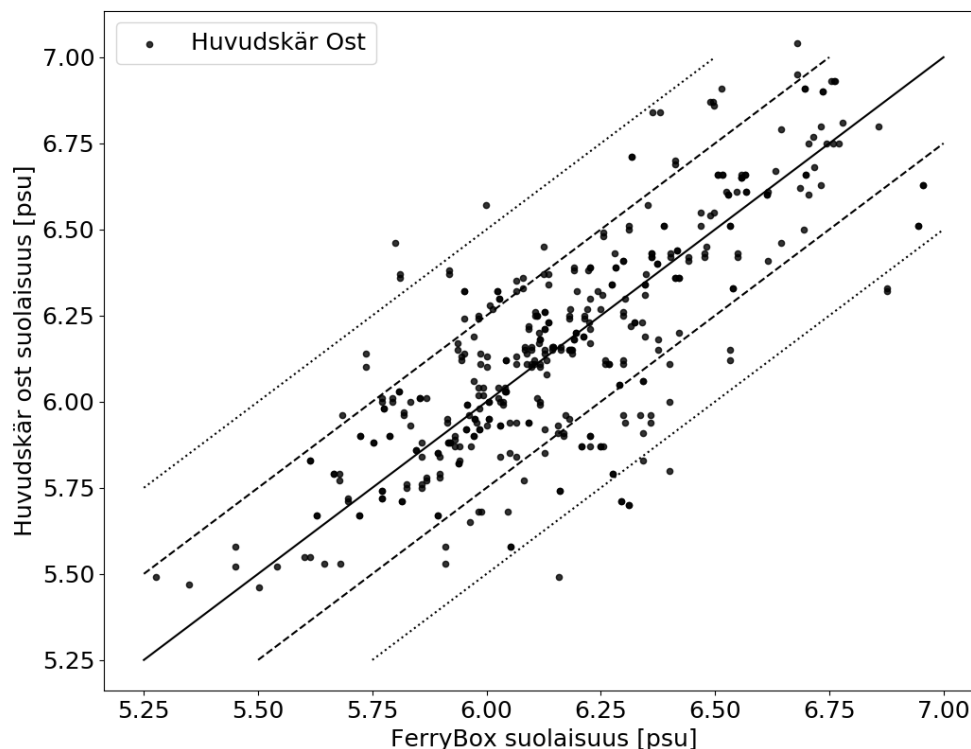
**Taulukko 3.2:** Kiinteiden mittausasemien статистиikkaa. FerryBox data näyttää vastaavan hyvin kaikkia asemia Svenska Högarin viimeisiä vuosia lukuun ottamatta.

Pisteen nimi	Maximi- etäisyys (km)	Maksimi aikaero (tunti)	Mittauspar- ien lukumäärä	Suhteellisen erotuksen keskiarvo	Absoluuttisen erotuksen keskiarvo	R <sup>2</sup>
Lämpötila					°C	
Oulu Santapankki	3	1	111	0,128	0,518	0,952
Perämeren aaltopoiju	5	0,5	254	0,032	0,288	0,991
Svenska Högarina 2009-2014	18	24	113	0,128	0,897	0,966
Svenska Högarina 2015-2017	18	24	90	0,307	2,333	0,606
Huvudskär Ost	7	1	416	0,042	0,367	0,988
Knolls Grund	8	1	458	0,034	0,284	0,994
Suolaisuus					[psu]	
Huvudskär Ost	7	1	412	0,025	0,153	0,507

dynaamisuudesta. Svenska Högarin 18 km etäisyys on todennäköisin syy ennen vuotta 2015 olleeseen keskimäärin 0,9°C eroon.

Myös FerryBoxin suolaisuus näyttää vertaantuvan hyvin Huvudskär Ostin suolaisuusmittauksiin (kuva 3.4c) seuraten hyvin aseman vuosivaihteluita. Suolaisuus vaihteli alueella koko mittausajanjakson 5,25 psu:n ja 7,25 psu:n välillä. Oli myös hetkiä jolloin suolaisuus muuttui yli 1 psu parin päivän sisällä, esimerkiksi 2011 ke-sällä (kuva 3.4c). Suurin osa mittauspareista erosi kuitenkin toisistaan korkeintaan 0,25 psu ja vain kourallinen erosi enemmän kuin 0,5 psu (kuva 3.6). Keskimääräinen ero oli 0,15 psu (taulukko 3.2). Korrelaatio oli kuitenkin huomattavasti heikompaa kuin asemien lämpötiloilla tai CTD -mittausten kohdalla. Huvudskär Ostin suolaisuuden determinaatiokerroin ( $R^2$ ) oli 0,51. Tämä johtuu oletettavasti siitä, että suolaisuus muuttuu nopeasti, koska alue on rannikon lähellä ulkosaaristossa.

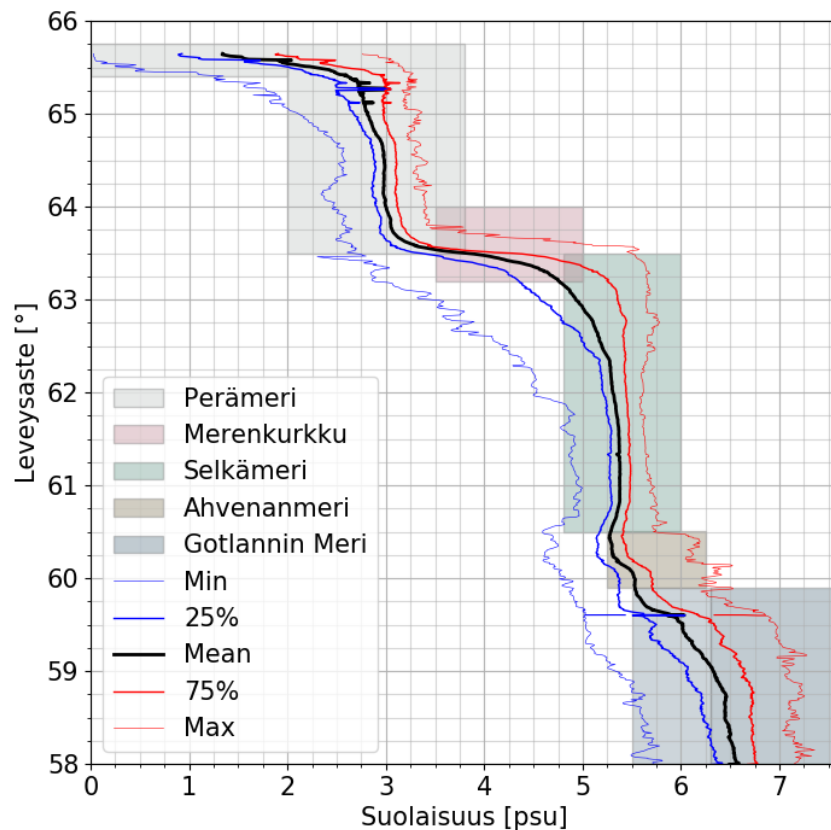
Kaiken kaikkiaan FerryBox -data näyttää vastaavan varsin hyvin sekä CTD:n että kiinteiden asemien mittauksia joitain poikkeavia mittauksia lukuun ottamatta. Samansuuntaisia tuloksia sai myös Transpaperin FerryBoxia kehittävä tiimi julkai-sussaan (Karlson, Andersson et al., 2016), jossa todetaan että lämpötila ja suo-laisuusmittaukset korreloivat hyvin tutkimusaluksesta mitattujen arvojen kanssa. Dataa voi siis hyvin käyttää suolaisuuden ja lämpötilan seurantaan ja tutkimiseen.



**Kuva 3.6:** Huvudskär Ost suolaisuusmittaus verrattuna FerryBoxiin. Katkoviivan sisällä olevien pisteiden ero on alle 0,25 psu ja pisteviivan sisällä alle 0,5 psu.

## 3.2 Suolaisuuden alueelliset keskiarvot

Transpaperin oletusreitille Gotlannista Kemiin laskettiin reittipisteet 1 km rajauksella, joille laskettiin keskiarvo koko mittausajanjakson yli. Oletusreitille siis määriteltiin 1 km välein reittipisteet jonka jälkeen jokaiselle FerryBox -havainnolle katsottiin lähin reittipiste, jos niistä mikään oli korkeintaan 5 km etäisyydellä. Jokaiselle reittipisteelle laskettiin tämän jälkeen keskiarvo kaikista niistä pisteistä jotka olivat lähinnä sitä. Saatu reitin keskiarvosuolaisuus (kuva 3.7) seuraa hyvin aiempia havaintoja alueelta seuraten kappaleessa 1.2 kuvattuja altaita (kuva 1.3). Datasta erotuu kolme aluetta jossa suolaisuus muuttuu paikallisesti vähän; Perämeri, Pohjanlahti ja Gotlanninmeren länsiosa, sekä niiden välillä olevat alueet joissa suolaisuuden



**Kuva 3.7:** Koko tarkasteluajanjakson yli lasketut alueellinen suolaisuuden keskiarvo reitillä (musta), minimi- ja maksimi-arvot (ohuet viivat), sekä 25 % ja 75 % kuvaajat. Harmaansävyiset alueet kuvaavat kappaleessa 1.2.3 kuvattuja suolaisuusarvoja Leppärannan ja Myrbergin (2009) kirjasta.

pohjois-eteläsuuntainen gradientti on iso, eli Perämeren pohjoisosa, Merenkurkku, sekä Ahvenanmeri ja Gotlanninmeren pohjoisosa.

Gotlanninmerellä eli  $58^{\circ}$ – $59^{\circ}$   $50'$  N (kuva 1.3) suolaisuuden alueellinen keskiarvo on 5,53 ja 6,58 psu:n välillä, laskien tasaisesti pohjoista kohti. Suolaisuus vähenee enemmän pohjoisessa, lähestyttäessä Ahvenanmerta. Ahvenanmerellä ( $59^{\circ}$   $50'$ – $60^{\circ}$   $30'$  N) suolaisuus jatkaa vähenemistään käyden matalimmillaan 5,27 psu:ssa. Suolaisuus kasvaa hieman Selkämeren eteläosassa, reitin mennessä kauemmaksi Ruotsin rannikolta. Selkämeren etelä- ja keskiosan suolaisuuden vaihtelu on vähäistä noin

62° 30'N leveyspiiriin asti, keskiarvon vaihdellessa 5,19 psu:n ja 5,38 psu:n välillä. Suolaisuus alkaa tämän jälkeen laskea enemmän Merenkurkkua lähestyttäessä. Suurinta keskiarvon pohjois–eteläsuuntainen muutos on 63° 15' ja 63° 45'N leveyspiirin välillä, eli juuri Merenkurkussa, jossa suolaisuuden keskiarvo laskee 4,69 psu:sta 3,06 psu:hun. Perämerellä suolaisuus vaihtelee jälleen vähemmän laskien hieman pohjoiseen päin mentäessä. Suolaisuus on 2,71 psu 65 ° 15'N kohdalla, jonka jälkeen suolaisuus alkaa taas vähenemään jyrkemmin rannikkoa lähestyttäessä. Keskiarvo Kemin edustalla on 1,33 psu. Mittauksista saadut keskiarvot vastaavat myös aiemmin alueelle esitettyjä arvoja (mm. Leppäranta ja Myrberg, 2009 ks. luku 1.2). Gotlannin meren pohjoisosissa arvot ovat alle Leppäranta ja Myrbergin (2009) (taulukko 3.4 s. 74) antaman 6,3 ‰ suolaisuuden. Arvot pysyvät kuitenkin hyvin samassa kirjassa esitetyn kartan (kuva 3.19 s. 80) 5,5 ‰ rajoissa (kappale 1.2).

Keskiarvojen lisäksi laskettiin 25 % ja 75 % luottamusarvot, eli väli jonka sisällä 50 % jokaisen pisteen lähellä mitatuista havainnoista sijaitsee. Myös 25 %–75 % väli pysyy pääosin kirjallisuudessa annettujen keskiarvojen sisällä, poislukien Merenkurkku ja Ahvenanmeri (kuva 3.7). Näillä alueilla on 25 % suolaisuus kirjallisuuden keskiarvoväliä matalampi (kuva 3.7). 75 % arvo ei sen sijaan missään vaiheessa ole alueelle annettua keskiarvoväliä suurempi. Saadut hieman matalat suolaisuuden arvot voivat johtua useasta syystä. Ne voivat viitata esimerkiksi lievään suolaisuuden muutokseen. Ero voisi toisaalta myös johtua mittausten eri ajankohdista vuoden sisällä, tai siitä että aiempia keskiarvoja laskettaessa ei ole käytetty rannikon lähellä olevia mittauksia, tai niitä ei ole ollut saatavilla. Leppärannan ja Myrbergin (2009) esittämässä Bockin (1971) heinäkuun kartassa on kuitenkin rannikon lähellä matalampia arvoja kuin heidän esittämässään taulukossa: Esimerkkinä edellä mainittu ero heinäkuun keskiarvokartan ja Gotlannin meren annetun alarajan välillä.

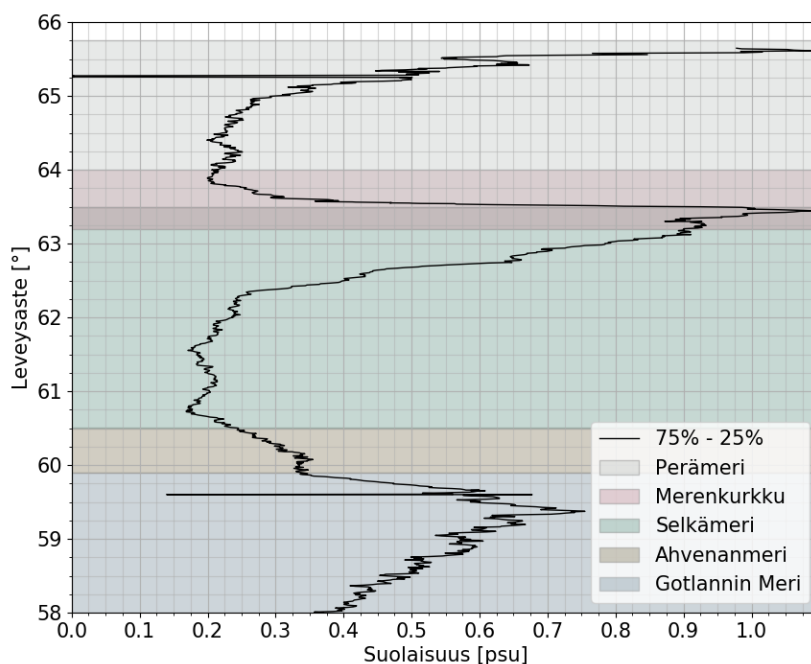
Pidemmän aikavälin suolaisuusdataa ovat analysoineet esimerkiksi Fonselius (1996) 100 vuoden datalla sekä Kuosa et al. (2017) 1979–2012 olevalla datalla. Ana-

lyyseistä näkee, että Pohjanlahden ja Pääaltaan suolaisuus oli korkealla 1950–1980, jonka jälkeen suolaisuusarvot taas laskivat 1980-luvun aikana. Syväveden suolaisuus alkoi jälleen nousta 2000-luvulla, mutta samanlaista selvää uutta suolaisuusarvojen kasvua ei Pohjanlahden pintavedessä näy. Itämeren keskiarvosuolaisuus oli sama 2000-luvun alussa kuin tässä tutkielmassa käytetyn aikasarjan alussa. Kun katsoo FerryBox -datan suolaisuuden hieman matalia arvoja pidempien aikasarjojen valossa, nämä luultavasti johtuvat viime vuosikymmenien jatkuvasta pintasuolaisuuden laskusta, joka Kuosa et al. (2017) mukaan johtuu luultavasti osittain (syväveden suolaisuuden muutoksien lisäksi) Pohjanlahden jokivalunnan kasvusta (Räike et al., 2012). Muita syitä voisi esimerkiksi olla maankäytön muutokset. FerryBox -datan aikasarja on liian lyhyt pidempiaikaisempien muutosten tutkimiseen

### 3.3 Suolaisuuden vaihtelu

Suolaisuus vaihtelee eniten Perämeren pohjoisosissa, Merenkurkussa, Selkämeren pohjoisosissa ja Itämeren Pääaltaalla. Vähiten vaihtelua esiintyy Selkämeren ja Perämeren keskiosissa, kuten oletettiin (kuvat 3.7, 3.8, 3.10, 3.9). Perämeren pohjoisosissa sekä Merenkurkun Selkämeren puoleisessa osassa keskihajonta on jopa 0,7 psu ja Ahvenanmerellä, Selkämeren pohjoisosissa 0,2–0,6 ja Pääaltaalla noin 0,3–0,4. Selkämeren keski ja eteläosissa ja Perämeren keskiosissa keskihajonta on alle 0,2.

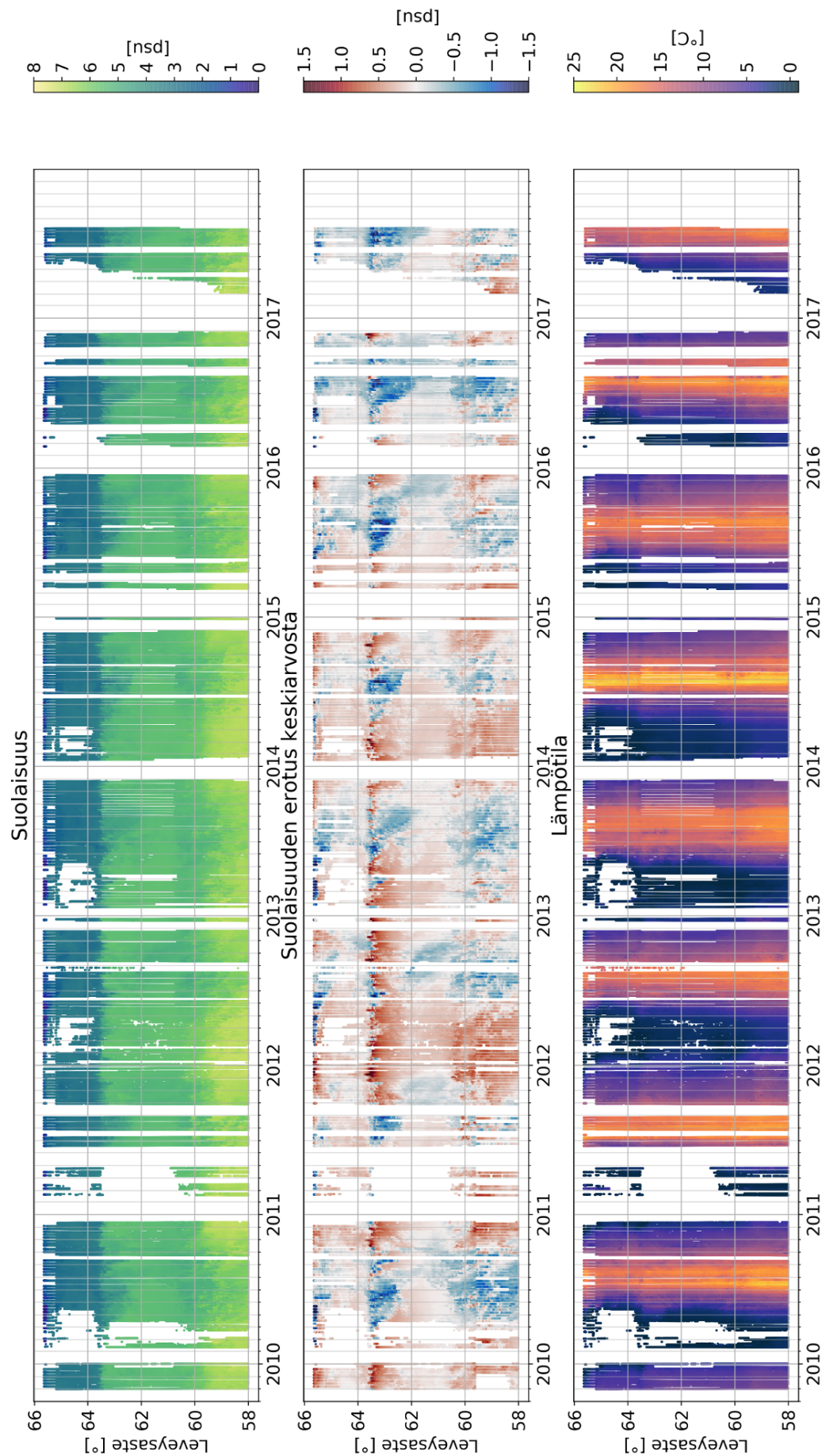
Myös 25 % ja 75 % luottamusarvot (katso kappale 3.2, kuva 3.7) antavat kuvan siitä miten paljon suolaisuus vaihtelee tietyllä alueella. Kvartaalit ovat selittävämpi tarkastelumuuttuja kuin mitatut maksimi- ja minimiarvot, joihin mahdolliset virheet ja ääritapaukset vaikuttavat enemmän. Kuvassa 3.8 on näistä luottamusarvoista laskettu erotus paikan suhteen. Arvot seuraavat samaa muotoa kuin suolaisuuden keskihajonta. Aivan Perämeren pohjoisosissa 25% ja 75% arvot eroavat noin 1 psu:n verran, mutta vaihtelu vähenee melko jyrkästi etelään päin mentäessä ja on jo 65° N



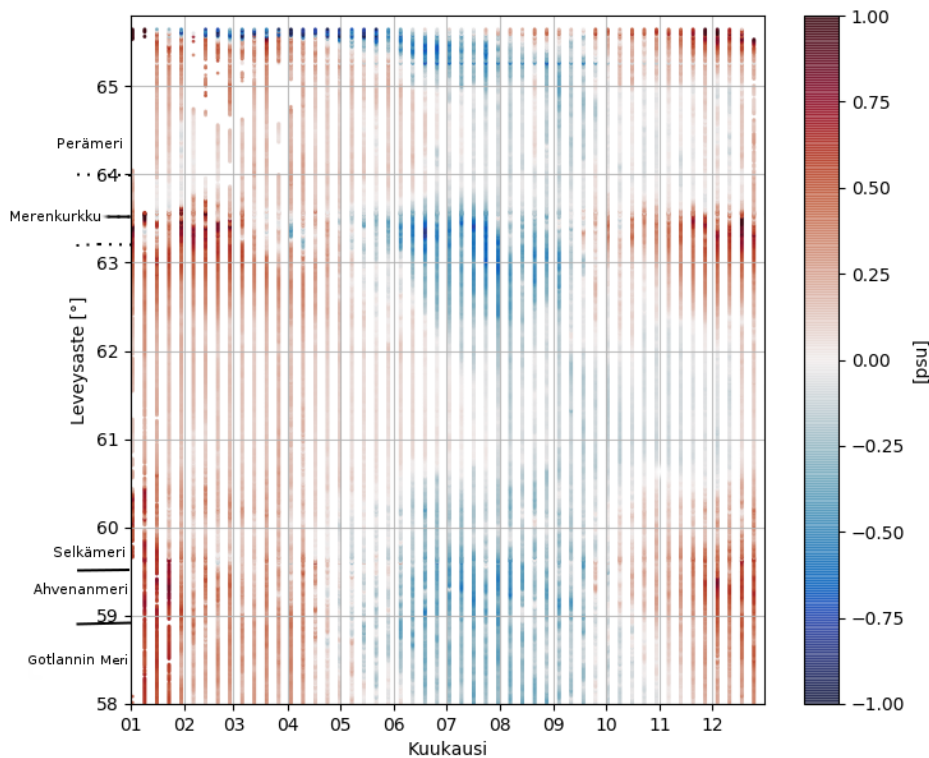
**Kuva 3.8:** Koko tarkasteluajanjakson yli laskettujen alueellisten suolaisuuksien keskiarvojen luottamusarvojen 25 % ja 75 % (kuva 3.7) erotukset. Kuvaajassa olevat yksittäiset piikit johtuvat pienestä määrästä mittauksia, jotka on tehty juuri reitin mutkien kohdalla

kohdalla 0,3 psu ja Perämeren keskiosissa vain 0,2–0,25 psu. Merenkurkussa 25% ja 75% arvojen väli kasvaa jälleen ja on suurimmillaan noin 1,1 psu. Selkämerellä erotus laskee alle 0,4 psu:n 62,5°N kohdalla ja on leveysasteilla 60°N–62,5°N 0,17–0,25 psu. Vaihtelu lisääntyy jälleen Ahvenanmerellä ollen Ahvenanmeren eteläosissa noin 0,35 psu. Vaihteluväli kasvaa edelleen Gotlannin merelle mentäessä ja on suurimmillaan noin 0,76 psu. Gotlannin edustalla vaihtelu on noin 0,5 psu. Vaihtelu on siis suuressa osassa aluetta alle oletetun 0,5 psu:n (kappale 1.2) paitsi muutosalueilla, joissa vaihteluiden oletettiin olevan suurempia. Gotlannin merellä mitattu suolaisuuden vaihtelu oli hieman suurempi kuin odotettu, mutta toisaalta laivan reitti kulkee tällä alueella rannikon lähetyvillä, mikä voi aiheuttaa enemmän suolaisuuden vaihtelua.

Suolaisuudessa on selvästi nähtävissä oletetun mukainen vuodenaikaisvaihte-



**Kuva 3.9:** Koko aikasarjan (2009–2017) suolaisuus, suolaisuuden erotus paikallisesta keskiarvosta sekä lämpötila. Leveysaste y-akselilla ja aika x-akselilla.



**Kuva 3.10:** Suolaisuuden viikkokeskiarvon ero koko ajan keskiarvosta. Tässä havainnot on jaettu jälleen 1 km välein reiteille (kuten kappaleessa 3.2), jonka jälkeen ne on jaettu myös mittausviikon mukaan ja laskettu saadun keskiarvon ja koko ajan yli lasketun keskiarvon erotus.

lu, vaikka vuosien välillä näkyy eroja, joita tarkastellaan myöhemmin (kuva 3.9). Keskimääräisen vuosikierron näkemiseksi laskettiin viikkokeskiarvot, ja niiden erotus koko ajanjaksosta lasketusta keskiarvosta. Näin nähdään miten pintasuolaisuus keskimäärin vaihtelee vuoden yli (kuva 3.10). Aivan Perämeren pohjoisosissa alkaa vuosikeskiarvoa vähäsuolaisempi ajanjakso helmikuun tienoilla. Vähäsuolaisempi vesi alkaa näkyä tästä hieman etelämpänä kesäkuun tienoilla ja Perämeren keskiosissa heinä–syyskuussa, vaikkakin huomattavasti laimeampana, koska vähäsuolaisempi vesi on ehtinyt sekoittua meriveteen. Suolaisuus alkaa loppukesästä ja syksystä jälleen lisääntyä. Pohjoisen rannikon lähellä vesi alkaa muuttua keskimääräistä suolaisemmaksi jo heinäkuussa, kun taas Perämeren keskiosissa ollaan keskimääräistä

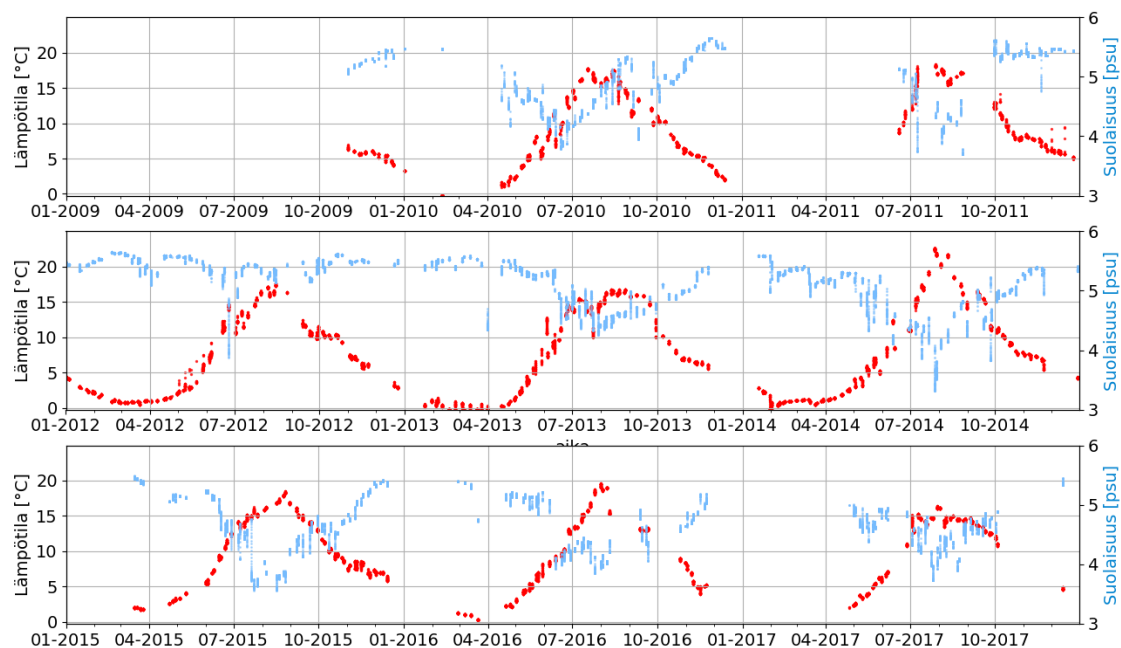


suolaisemmissa lukemissa vasta lokakuussa. Syitä näille alueellisille eroille ovat etäisyys rannikosta sekä merivirrat. Vähäsuolaisempi kerros syntyy kun jokivirtaamana tuleva vesi sekoittuu pintaveteen. Jokivalunnan vaikutus näkyy ensin lähellä rannikkoa, missä se sekoittuu pintaveteen, joka siirtyy pintavirtauksen mukana kauemmas rannikosta. Pintavalunnan vaikutus vähenee avomerelle mentäessä, koska vähäsuolaisempi vesi sekoittuu matkalla suurempaan määrään vettä.

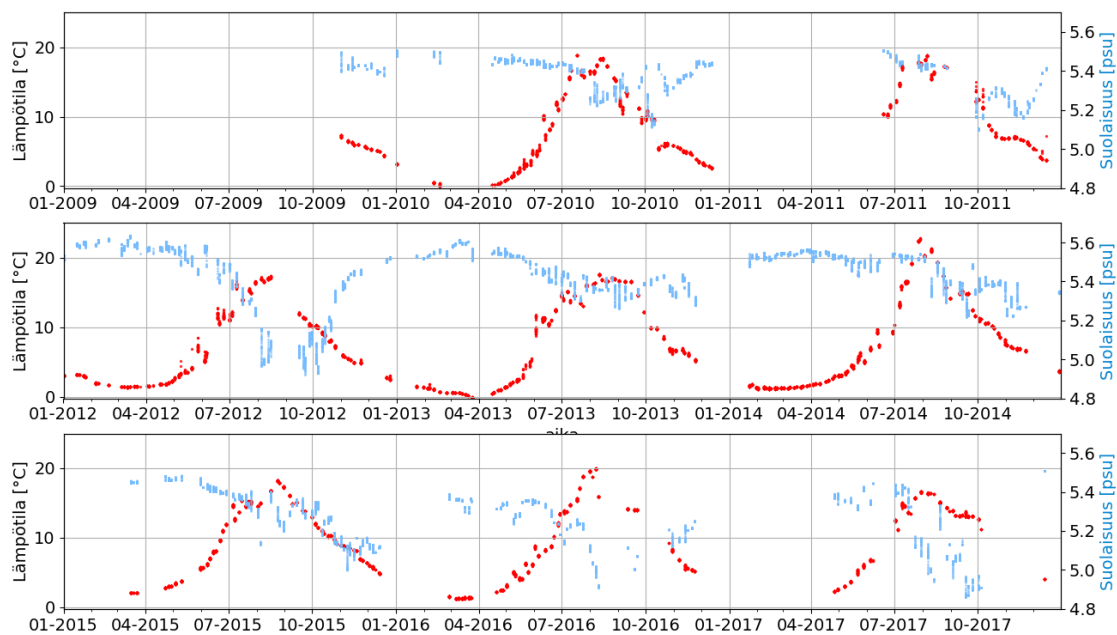
Kesä on muita vuodenaikoja vähäsuolaisempi myös mittausalueen muissa osissa. Merenkurkussa tämä vähäsuolaisempi kausi alkaa hieman myöhemmin kuin Perämeren pohjoisosissa, eli toukokuussa. Myös Selkämeren pintavesi makeutuu myöhemmin ja vaihtelu on varsinkin etelämpänä pienempää kuin Merenkurkussa. Ahvenanmerellä nähdään että talvella pintavesi on keskiarvoa suolaisempaa ja kesällä makeampaa, mutta vaihtelu ei ole yhtä tasaista kuin Merenkurkussa ja Perämeren pohjoisosissa, vaan siinä näkyy enemmän lyhytaikaista vaihtelua, sekä vuosien välisiä eroja. Gotlanninmerellä vaihtelu on suurempaa kuin Selkämeren ja Perämeren keskiosissa, mutta kuitenkin pienempää kuin esimerkiksi Ahvenanmerellä.

Edellä on siis kuvattu miltä keskimääräinen vuosi näyttää Pohjoisen Itämeren suolaisuudessa. Kun seuraavaksi katsomme koko datan suolaisuusarvoja sekä suolaisuuden hetkittäistä eroa koko tarkasteluajanjakson keskiarvosta (kuva 3.9) huomaamme, että vuosikierto erottuu selkeästi. Myös vuosien välisiä eroja nousee esiin.

Vuodet 2016 ja 2017 ovat muita mittausvuosia vähäsuolaisemmat (kuva 3.9 suolaisuuden eroitus keskiarvosta). 2011–2012 sekä syksystä 2013 kesään 2014 olivat puolestaan keskimääräistä suolaisemmat. Näiden selvästi koko mittausalueen yli erottuvien ajanjaksojen lisäksi näkyy paikallisempia eroja keskiarvosta. Esimerkiksi kesällä 2012 Merenkurkun alueella ei näy selvää makeutumista kuten muina vuosina, mutta esim. Perämerellä ja Pääaltaalla näkyy loppukesän vähäsuolaisempi alue. Perämerellä vähäsuolaisempi ajanjakso on jopa selkeämpi kuin monena muuna



(a) Merenkurkun eteläpuoli laivan reitillä leveysasteella 63°N



(b) Selkämeri laivan reitillä leveysasteella 61,5°N

**Kuva 3.11:** Suolaisuus ja lämpötila Selkämeren keskeltä sekä Merenkurkun eteläpuolelta.

vuonna.

Kun tehdään johtopäätöksiä yksittäisistä vuosista eikä pidemmän ajan tai laajemman alueen keskiarvoista, kannattaa huomioida että aikasarjassa on puuttuvia pätkiä jotka nousevat tällä tarkastelutasolla merkitsevämmäksi. Osa näistä johtuu siitä, että laiva kulki esimerkiksi jäiden takia vaihtoehtoista reittiä, ja osa määriteltiin laaduntarkastelussa huonoksi (kappale 2.1.3).

## 3.4 Lämpötila

Lämpötila Pohjanlahdella ja Itämeren Pääaltaalla, Gotlannista pohjoiseen (kappale 1.2) vaihteli tarkastelujakson aikana  $-0,45^{\circ}\text{C}$  ja  $24,5^{\circ}\text{C}$  välillä. Kylmintä oli yleensä helmi–maaliskuussa. Keväällä lämpeneminen alkoi yleensä huhtikuussa, paitsi Perämerellä, jossa alkoi kunnolla lämmetä vasta toukokuussa, koska jäät sulavat usein vasta silloin (kappale 1.2.3). Lämpimintä oli yleensä heinä–elokuussa. Lämpötila nousi yleensä nopeimmin kesä–heinäkuussa, ja laski yleensä nopeimmin elokuukuussa. Lämpötilan pohjois–eteläsuuntainen ero oli suurimmillaan noin  $8^{\circ}\text{C}$ . Pienintä vaihtelu oli lopputalvella kun lämpötila etelässä oli pari astetta plussalla ja pohjoisessa meri oli jäässä. Samoin kesällä, jolloin koko alue oli lämmin ja eteläosa yleensä pari astetta pohjoisosia lämpimämpi. Esiintyi myös tilanteita, joissa pohjoisessa saattoi hetkellisesti olla etelää lämpimämpää vallitsevista sääolosuhteista johtuen. Suurinta alueiden välinen vaihtelu oli loppusyksystä ja alkukevästä, kun etelässä meri lämpeni aikaisemmin ja jäähdyi myöhemmin. Lämpötila saattaa myös vaihdella nopeasti esimerkiksi tuulen aiheuttamasta sekoittumisesta johtuen. Näin tapahtui esimerkiksi 26.8.2014, jolloin lämpötila laski paikoitellen jopa  $5^{\circ}\text{C}$  jopa yli 20 m/s puhaltaneen pohjoistuulen seurauksena.

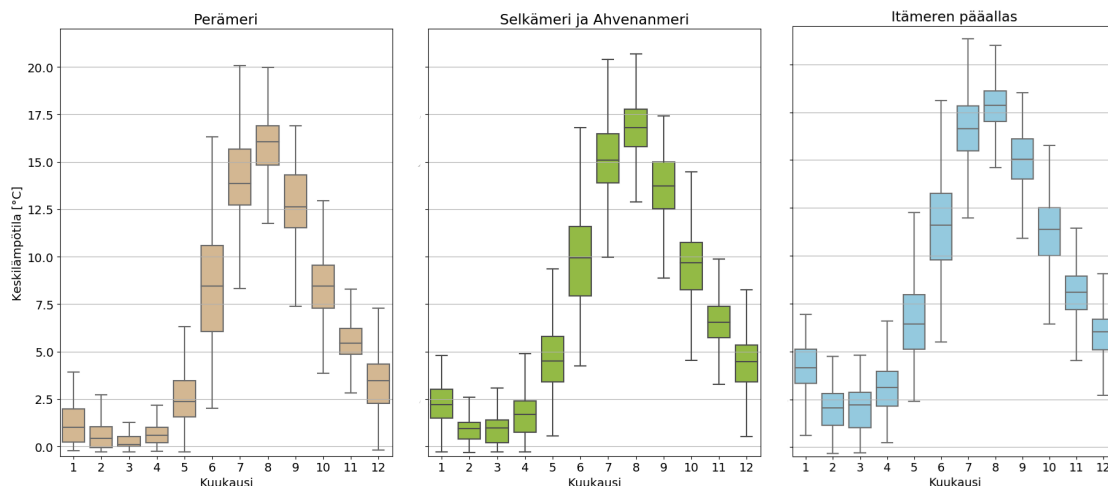
Ajanjakson lämpimin vuosi oli 2014, (kuva 3.9), jolloin heinä–elokuun pintalämpötilat olivat korkealla koko alueella. Lämpimin arvo,  $24,5^{\circ}\text{C}$  mitattiin 27.7. pääaltaalla. Selkämerellä korkein mitattu lämpötila oli Ilmatieteen laitoksen mukaan

23,5°C ja Perämerellä 23,1°C. 2014 oli myös Suomen mittaushistorian siihen asti toiseksi lämpimin vuosi. Mittausajanjakson toiseksi lämpimin kesä oli 2010, jolloin mitattu huippulukema oli 23,25°C Itämeren Pääaltaalla, mutta Pohjanlahden lämpötila jäi tällöin matalammaksi: 20,4°C Selkämerellä ja 19,0°C Perämerellä. Pohjoisessa mittaussjakson toiseksi lämpimin kesä oli sen sijaan 2016 jolloin Perämerellä mitattiin 20,5°C lämpötila. Pääaltaalla maksimilämpötila jäi tällöin 20,8°C:seen mikä on vähemmän kuin vuonna 2010. Kesä 2010 oli suuressa osassa maata tavanomaista lämpimämpi. Varsinkin maan eteläosissa mitattiin jopa 2–3°C yli keskiarvon. 2016 taas suurimmat poikkeamat vuosikeskiarvoon olivat pohjoisessa.

Kylmin vuosi oli 2017, jolloin maksimilämpötila oli 18,7°C, ja kesä oli tavanomaista viileämpi. Myös vuoden 2012 kesänä maksimilämpötila jäi alle 19°C, ja kesä oli tavanomaista sateisempi ja viileämpi (Ilmatieteen vuosikertomukset 2009–2017 ([http://ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-20\\*\\*](http://ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-20**)), siteerauspäivä 30.1.2018).

Ylipäänsä lämpötilat olivat koko tarkastelujaksona hieman korkeampia kuin kappaleessa 1.2 esitetyt arvot. Leppärannan ja Myrbergin käyttämä lähde on 70-luvun alusta, ja useat muut tutkimukset ovat osoittaneet, että veden pintalämpötilat ovat nousseet sen jälkeen (BACCII, 2015). Esimerkiksi 1990–2008 mitatun satelliittidatan perusteella pintalämpötilojen vuosikeskiarvot ovat alueella nousseet yli 0,5°C/vuosisadassa, Perämerellä jopa 1°C vuosisadassa (Lehmann et al., 2011). Bradtke et al. (2010) mukaan keskilämpötila on Pohjanlahdella ja pohjoisella Pääaltaalla kasvanut yli 2°C/vuosisadassa elokuussa. Myös viime vuosien tutkimuksissa esim. Kuosa et. al. (2016) havaitsivat merkittävää pintalämpötilan kasvua sekä kerrostuneisuuden lisääntymistä.

FerryBox -datalle laskettiin kuukausikeskiarvot koko ajanjakson yli Itämeren Pääaltaalle, Selkämerelle ja Ahvenanmerelle sekä Perämerelle (kuva 3.12). Verrattuna Leppärannan ja Myrbergin (2009) esittämiin ennen 70-lukuja mitattuihin arvoihin, FerryBox -datasta lasketut lämpötilan kuukausikeskiarvot ovat usein korkeam-



**Kuva 3.12:** Koko FerryBox -datasta lasketut kuukausilämpötilat Perämerellä (leveysaste > 63°30'N) Selkämerelle ja Ahvenanmerelle (leveysaste 59°50'N–63°30'N), ja Itämeren Pääaltaalle (leveysaste (58°N–59°50'N)).

pia. Varsinkin lokakuussa pohjoisessa mitatut arvot ovat huomattavasti esitettyjä arvoja korkeammalla, mikä voisi viitata siihen että meri jäähtyy myöhemmin. Perämerellä lokakuun keskimääräinen lämpötila on 8,5°C. Tämä on 2,5°C enemmän kuin kirjassa esitetty 4–6°C. Keskimääräinen lämpötila laskee 4°C tuntumaan vain ihan Perämeren pohjoisosassa jos otetaan huomioon vain lokakuun viimeinen viikko, ja silloinkin eteläisen Perämeren keskiarvo on noin 7°C. Myös Selkämeren keskilämpötila, 9,7°C oli korkeampi kuin kappaleessa 1.2 kuvatut 5–8°C arvot.

Pääaltaalla mitatut lokakuun lämpötilat vastaavat kirjallisuuden arvoja keskiarvoltaan. Keskiarvo oli 11,4°C, mikä on kirjassa esitetyn 10–12°C sisällä. Moni lokakuu alkoi kuitenkin yli 15°C lämpötiloilla, joka on annettujen arvojen ulkopuolella.

Myös kesällä lämpötilat olivat varsinkin pohjoisessa hieman korkeammalla kuin Leppärannan ja Myrbergin (2009) kirjassa esitetty lämpötila, vaikka eivät yhtä paljon kuin lokakuussa. Sekä Perämerelle että Selkämerelle on heinä–elokuun lämpötila 13–15°C, mutta FerryBox datassa lämpötila oli joka kesä pidempiä jaksoja yli

15°C. Perämeren heinä–elokuun keskiarvo oli 13,1–16,1°C, ja elokuussa 50% kaisista Perämeren mittauksista olivat välillä 14,8–16,9°C. Selkämerellä keskiarvo oli 15,1–16,8°C. Pääaltaalla Gotlannin merellä lämpötila kävi miltein joka vuonna vähintään 18°C, ja keskiarvo oli 16,6–17,9°C, kun alueelle Leppärannan ja Myrbergin (2009) kirjassa heinä–elokuun lämpötila on 15–17°C.

### 3.5 Ferryboxin hyödyt tutkimuksessa ja seurannassa

FerryBox mittaa laajalta alueelta säännöllisemmin kuin perinteiset mittausmenetelmät. Esimerkiksi M/V Transpaperin reitti käy tietyssä pisteessä noin kerran viikossa, kun taas perinteisiä monitorointimatkoja tehdään yleensä Pohjanlahdella vain noin neljä kertaa vuodessa. Näiden lisäksi on olemassa pysyviä mittausasemia, jotka keräävät dataa jatkuvasti, mutta vain tietyistä paikoista, jotka sijaitsevat yleensä lähellä rannikkoa huollon helpottamiseksi. Tämän lisäksi suurin osa mittausasemista ei mittaa suolaisuutta. In-situ mittauksen lisäksi merenpinnan lämpötilasta saadaan dataa esimerkiksi satelliittimittauksista, mutta esimerkiksi suolaisuuden satelliittimittausmenetelmät tarvitsevat vielä kehitystä toimiakseen Itämerellä. Myös monia muita FerryBoxin mittaamia parametreja ei osata vielä mitata kaukokartoitusmenetelmillä. Lisäksi FerryBox on lämpötilan osalta hyvä lisä, jolla voidaan validoida satelliittimittauksia.

Argo-pojut ovat toinen tärkeä uusi mittausmenetelmä Itämerellä FerryBoxien lisäksi. Ne mittaavat tiheämmin ja laajemmalla alueella kuin perinteiset mittausmenetelmät. Toisin kuin FerryBoxit, Argo -poijut mittaavat tutkittavien suureiden profileja koko vesipatsaan syvyydeltä. Niitä voidaan kuitenkin ohjata ainoastaan syvyyden osalta. Poijujen reittiä ei siis voi määritellä ennalta, vaan ne kulkevat merivirtausten mukana. FerryBoxin mittausdataa on siten helpompi vertailla ajalli-

sesti, koska laiva kulkee jatkuvasti samaa reittiä. On myös syytä muistaa, että Argo-poijuja on toistaiseksi käytössä lähinnä Selkämeren syvemmillä alueilla, eikä laite tee mittauksia neljää metriä lähemänä pintaa (Haavisto et al., 2018). Argo-poijuja on myös Perämerellä (Laura Tuomi, henkilökohtainen tiedonanto). Ilmatieteen laitos on Argo-poijujen lisäksi kokeillut eteläisellä Pohjanlahdella liidintä<sup>1</sup> 2016 ja 2017 syksyinä (Alenius et al., 2018). Toisin kuin Argoja, liitimiä on mahdollista ohjata ennalta määrätuille reiteille. Liidin voidaan ohjata halutulle alueelle, mutta se vaatii enemmän operoimista kuin poijut.

Talvi aiheuttaa datan tulkinntalle hieman ongelmia: Laivat joutuvat kiertämään jäätä, jolloin reitti ei pysy vakiona, ja datapisteiden vertailu keskenään vaikeutuu. Dataa kuitenkin saadaan myös talvella, toisin kuin monesta muusta jatkuvan mittauksen laitteistosta. Monia niistä joudutaan nimittäin poistamaan merestä jäätalven ajaksi. Jo kertyneestä ja parhaillaan kerättävästä Ferrybox -datasta voisi saada lisätutkimuksella hyödyllistä tietoa esimerkiksi Itämeren pintasuolaisuuden käyttäytymisestä jääaikaan, sekä monesta muusta laitteiston mittaamasta parametrista.

Kaiken kaikkiaan FerryBox on hyvä lisä Itämeren pintavesien seurantaan. Eri laivareittien datan saatavuus riippuu sitä ylläpitävästä instanssista. Esimerkiksi tässä tutkielmassa käytetystä CMEMS datasetistä löytyy vain M/V Transpaperista osalta lämpötila ja suolaisuus (kappale 2.1.3). CMEMS -datassa oli epäluotettavia mittauksia sille tehdyn automaattisen laadunvarmennuksen jälkeen, joten sille täytyy tehdä laadunvarmennus käytettävyyden parantamiseksi. Analyysien kannalta olisi ollut hyödyksi jos datasetissä olisi ollut myös metadataa kuten pumpun arvot sekä molemmat lämpötilat, tämä olisi helpottanut ylimääräisen laadunvarmennuksen tekoa. Muuta M/V Transpaperin dataa voi, ainakin viimeisempien mittausten osalta, nähdä SMHI:n nettisivuilta<sup>2</sup> useamman parametrin osalta. Sivuilta voi nähdä

---

<sup>1</sup>Glider

<sup>2</sup>[https://www.smhi.se/hfa\\_coord/BOOS/Ferrybox/Transpaper/TransPaper\\_latest\\_route\\_temperature.htm](https://www.smhi.se/hfa_coord/BOOS/Ferrybox/Transpaper/TransPaper_latest_route_temperature.htm)

mittaukset lämpötilan, suolaisuuden, klorofylli-a:n, fykosyaniinin, hapen ja turbiditeetin osalta. Nämä mittaukset eivät kuitenkaan ole sivuilta ladattavissa.



## 4. Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tarkoituksena oli tarkastella Pohjanlahdella kulkevan M/V Trans-Paper -laivan FerryBox -laitteen suolaisuus- ja lämpötiladataa, selvittää onko se luotettavaa, mitä se kertoo Pohjanlahden lämpötila- ja suolaisuusoloista ja niiden vaihteluista, sekä katsoa miten se soveltuu suolaisuuden ja lämpötilan seurantaan ja tutkimiseen. Data vaikuttaa pääosin hyvälaatuiselta, mutta siinä on myös epäluotettavia havaintoja, joita automaattinen laadunvarmennus ei ole poistanut. Tällaiset arvot ovat vaikeita löytää datasta, koska dataa on paljon, ja ilman metatietoja esimerkiksi putkien virtauksesta ja aikaisemman automaattisen laatuluokitusten perusteista on hyvin vaikea tehdä kattava automatisoitu ohjelmisto joka pystyisi löytämään tällaiset kohdat luotettavasti. Lisäksi automaattinen laadunvarmennus on monesti saattanut löytää vain osan ajanjaksosta jossa data on epäluotettavaa, mutta ei ole osannut poistaa tätä kokonaan. On esimerkiksi merkitty huonoksi pätkä dataa jossa lämpötila on epäluotettavan korkea vuodenaikaan ja säätilaan nähden, mutta myös juuri ennen/jälkeen poistettua pätkää on samanlaisia arvoja. Koko virhetilanteen löytämiseksi voisikin miettiä laadunvarmennusta joka osaa havaita erilaisia ilmiöitä, esimerkiksi koneoppimista käyttäen.

Data näyttää ylimääräisen laaduntarkastuksen jälkeen vastaavan suolaisuuden ja lämpötilan osalta hyvin CTD:llä ja reittiä lähellä olevilla kiinteillä havaintoasemilla mitattuja arvoja. Data soveltuu siis hyvin suolaisuuden ja lämpötilan arvojen seurantaan, vaikka varsinkin ääritilanteissa kannattaa pyrkiä vertaamaan niitä mui-

hin mittauksiin mahdollisuuksien mukaan, jotta voidaan varmistaa, että ne ovat todellisia fysikaalisia ilmiöitä, eivätkä virheitä datassa.

Datasta tarkasteltiin suolaisuuden ja lämpötilan vuodenaikaisvaihtelua ja vuosien välisiä vaihteluita. Suolaisuudessa havaittiin selkeä vuosikierto, jossa kesäisin pintasuolaisuus oli talvea vähäisempää, kuten oli odotettavissa (kappale 1.2.1). Suolaisuusarvot näyttivät seuraavan varsin hyvin aikaisempiin tutkimuksiin perustuvia arvoja, vaikka joissain kohdin mitatut arvot olivat hieman esimerkiksi Leppärannan ja Myrbergin (2009) esittämien vaihteluvälien alarajoilla. Lämpötila sen sijaan oli korkeampi kuin esimerkiksi Leppärannan ja Myrbergin (2009) esittämät arvot. Varsinkin pohjoisessa lokakuussa mitattiin useampana vuonna yli  $4^{\circ}\text{C}$  lämpimämpiä arvoja kuin heidän esittämänsä (kappale 1.2), ja mitatut minimilämpötilatkin jäivät useampana vuonna yli  $6^{\circ}\text{C}$ :een, joka oli kirjassa annettu maksimiarvo lämpötilalle Perämerellä syksyllä. Tämä oli kuitenkin odotettavaa, koska Leppärannan ja Myrbergin (2009) siteeraamat suolaisuus- ja lämpötila -arvot on julkaistu 1970-luvun alussa. Uudemmassa kirjallisuudessa, esimerkiksi (BACCII, 2015), on toistuvasti havaittu, että pintalämpötilat ovat nousseet merkittävästi viimeisen 100 vuoden aikana. Nämä tutkimukset tosin yleensä keskittyvät vuosikeskiarvoihin eivätkä tietyn kuukauden keskiarvoissa tapahtuneisiin muutoksiin. SeaDataNetistä löytyisi Pohjoiselle Itämerelle laskettuja kuukausittaisia DIVA karttoja mm. suolaisuuden ja lämpötilan osalta (*Baltic Sea - Temperature and Salinity Climatology V1.1* 2015), mutta näiden käyttö vaatisi enemmän työtä, ja arvot ovat jollain alueilla epävarmoja harvasta mittadatasta johtuen. Kaikista vuosista 2014 oli keskimääräistä lämpimämpi, ja mitattu huippulämpötila oli koko alueella  $24,5^{\circ}\text{C}$  ja pohjoisessa Perämerelläkin  $23,1^{\circ}\text{C}$ .

FerryBox -datan laatu on hyvä ja ajallinen ja alueellinen kattavuus riittävä antamaan hyvän kuvan Pohjanlahden pintakerroksen lämpötilasta ja suolaisuudesta, sekä niiden vaihtelusta. Pintasuolaisuus on selvästi vähäisempää kesällä kuin talvel-

la. Nämä erot ovat suurempia rannikon lähellä altaiden välillä, ja pienempiä altaiden keskellä. Vuodenaikaisvaihtelu on monin paikoin yli 0,5‰, ja varsinkin muutosalueilla arvot voivat erota toisistaan jopa yli 1‰.

FerryBoxeilla saadaan dataa tiheämmällä aikavälillä kuin perinteisillä monitorointimatkoilla. Dataa saadaan myös talvella, toisin kuin monesta muusta automaattisesta mittausmetodista, joten FerryBox voisi olla hyvä työkalu tutkia pintasuolaisuuden käyttäytymistä talvisaikaan.

Lämpötila- ja suolaisuusdataa voisi perusseurannan lisäksi käyttää tutkittaessa, voisiko esimerkiksi Selkämeren pintasuolaisuuden kehityksestä arvioida Perämeren pohjakerroksen suolaisuuden muutosta, sekä samaa Selkämeren ja Itämeren Pääaltaan välillä. Tutkimusta voisi myös tehdä siitä miten jokien virtausmäärät vaikuttavat esimerkiksi jokisuiden lähellä tapahtuvaan pintasuolaisuuden vaihteluun, ja millainen korrelaatio näiden välissä on. Data voisi myös olla hyvä lisätyökalu mallien kehityksessä ja validoinnissa, koska sitä on tiheästi ja jatkuvasti pitkältä reitiltä, mutta tätä varten sen laaduntarkistuksen pitäisi olla kattavampi.

Kaiken kaikkiaan FerryBoxit vaikuttavat olevan hyvä ja kustannustehokas vaihtoehto Itämeren pintavesien seurantaan, vaikka datalle joudutaan tekemään ylimääräinen laadunvarmennus ennen tutkimuskäyttöä. FerryBox mittaa monia eri parametreja, enemmän kuin monet muut autonomiset mittalaitteistot, josta on hyötyä laajempia Itämeren tilaan liittyviä tutkimuksia tehdessä. Reittejä on tällä hetkellä Itämerellä 7, mutta vain yksi niistä kulkee Pohjanlahdella. kattavampien mittausten saamiseksi voisikin miettiä, olisiko kannattavaa valjastaa jokin Pohjanlahden poikki kulkeva alus, esimerkiksi Merenkurkun kohdalta.

## 5. Kiitokset

Haluaisin kiittää kaikkia jotka ovat auttaneet minua graduntekoprosessissa. Kiitos kaikille IL:n Merentutkimusyksikön ihmisille jotka auttoivat ja neuvoivat minua siellä gradua tehdessäni. Kiitos myös SMHI:n ja SYKE:n työntekijöille jotka esittelivät ja kuvasivat minulle laitteistoa, sekä vastasivat kysymyksiini.

Erityisesti haluaisin kiittää ohjaajaani Laura Tuomea, joka on ollut kannustava ja kärsivällinen. Haluaisin myös kiittää Lumikki Husua, jonka oikoluku auttoi valtavasti tekstini viilaamisessa. Kiitos myös kaikille jotka ovat kannustaneet minua tämän prosessin aikana.

# Kirjallisuus

- Alenius, P., K. Tikka, L. U., L. Tuomi, T. Purokoski ja e. a. Roiha P. (2018). "Euro-Argo in work and new potential of gliders in the Baltic Sea BOOS". Teoksessa: *Operational Oceanography serving Sustainable Marine Development. Proceedings of the Eight EuroGOOS International Conference. 3-5 October 2017, Bergen, Norway*. Toim. E. Buch, V. Fernández, D. Eparkhina, P. Gorringer ja G. Nolan. EuroGOOS. Brussels, Belgium, s. 143–148.
- Algaline 20 years of Baltic Sea monitoring* (2013). URL: [https://www.ferrybox.org/imperia/md/content/ferryboxusergroup/presentations/2013\\_fbws\\_algaline\\_syke\\_.pdf](https://www.ferrybox.org/imperia/md/content/ferryboxusergroup/presentations/2013_fbws_algaline_syke_.pdf).
- BACC II kirjoittajat (2015). *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Regional Climate Studies. Springer International Publishing.
- Baker, D. J. (1981). "Ocean instruments and experiment design". Teoksessa: *Evolution of Physical Oceanography*. Toim. B. A. Warren ja C. Wunsch. MIT Press, Cambridge. Luku 14, s. 300–420.
- Baltic Sea - In Situ Near Real Time Observations* (2018). data ladattu CMEMS:in dataportaalista [http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=INSITU\\_BAL\\_NRT\\_OBSERVATIONS\\_013\\_032](http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=INSITU_BAL_NRT_OBSERVATIONS_013_032).

- Baltic Sea - Temperature and Salinity Climatology V1.1* (2015). <https://sextant.ifremer.fr/en/web/seadatanet#/metadata/bf35a7c5-c843-4a23-8040-07ddcf3d8e71>.
- Batten, S., R. Clarl, J. Flinkman, G. Hays, E. John, A. John, T. Jonas, J. Lindley, D. Stevens ja A. Walne (2003). "CPR sampling: the technical background, materials and methods, consistency and comparability". *Progress in Oceanography* 58.
- Bock, K. H. (1971). "Monatskarten des Salzgehalten der Ostsee, dargestellt für verschiedene Tiefenhorizonte [Monthly salinity maps of the Baltic Sea for different depths]". *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*.
- Bradtke, K. ., H. A. ja U. JA. (2010). "Satial and interannual variations of seasonal sea surface temperature patterns in the Baltic Sea". *Oceanologia*.
- Brown, N. L. (1974). "A precision CTD microprofiler". Teoksessa: *Ocean 74 Record 1974 IEEE Conference on Engineering in the Ocean Environment*. IEEE Publication 74 CHO 873-0 OEC, Institute of Electrical ja Electronics Engineers, New York.
- Brumovský, M., J. Bečanová, J. Kohoutek, H. Thomas, W. Petersen, K. Sørensen, O. Sánka ja L. Nizzetto (2015). "Exploring the occurrence and distribution of contaminants of emerging concern through unmanned sampling from ships of opportunity in the North Sea". *Journal of Marine Systems*.
- CMEMS (2016). *QUID for Near Real Time IN SITU products*. 1.6. Copernicus marine environment monitoring service.
- Constantin, F., N. Manolis, T. Melilotus, L. Urmas ja B. I. Sana (2017). *Ferry-box activities in the CLAIM project – monitoring microplastics*. 8th FerryBox Workshop, Oslo - Kiel - Oslo.
- Ekman, F. L. ja O. Pettersson (1892). "Den svenska hydrografiska expeditionen år 1877 under ledning af F. L. Ekman". Teoksessa: vol. 25. Kongliga Svenska

- Vetenskaps-Akademiens Handlingar 1. Kungl. boktryckeriet. P.A. Norstedt & Söner, s. 1–163.
- European Commission Infocentre (2018, siteerauspäivä 12.12.2018). *Technology to tackle the plastic pollution threat to water ecosystems*. URL: [http://ec.europa.eu/research/infocentre/article\\_en.cfm?id=/research/headlines/news/article\\_18\\_04\\_11-1\\_en.html?infocentre&item=Infocentre&artid=48056](http://ec.europa.eu/research/infocentre/article_en.cfm?id=/research/headlines/news/article_18_04_11-1_en.html?infocentre&item=Infocentre&artid=48056).
- Farcy, P. (2016). *JERICO FP7 results regarding the FerryBox*. 7th FerryBox Workshop.
- Farcy, P. ja D. Durand (2017). *JERICO-RI: the European coastal observing system of systems, component of EOOS*. 8th FerryBox Workshop.
- FerryBox Task Team (Siteerauspäivä 1.6.2018). *Routes and Data-FerryBox Equipment*.
- First International Maritime Conference Held for Devising an Uniform System of Meteorological Observations at Sea* (1853). URL: [https://en.wikisource.org/wiki/First\\_International\\_Maritime\\_Conference\\_Held\\_for\\_Devising\\_an\\_Uniform\\_System\\_of\\_Meteorological\\_Observations\\_at\\_Sea](https://en.wikisource.org/wiki/First_International_Maritime_Conference_Held_for_Devising_an_Uniform_System_of_Meteorological_Observations_at_Sea).
- Fonselius, S. (1996). "Västerhavets och Östersjöns oceanografi". *SMHI, Norrköping, s. 200*.
- Grayek, S., J. Staneva, J. Schulz-Stellenfleth, W. Petersen ja E. V. Stanev (2011). "Use of FerryBox surface temperature and salinity measurements to improve model based state estimates for the German Bight". *Journal of Marine Systems*.
- Groetsch, P. M. M., S. G. H. Simis, M. A. Eleveld ja S. W. M. Peters (2016). "Spring blooms in the Baltic Sea have weakened but lengthened from 2000 to 2014". *Biogeosciences Discuss*.

- Gülzow, W., G. Rehder, J. S. v. Deimling, T. Seifert ja Z. Tóth (2013). "One year of continuous measurements constraining methane emissions from the Baltic Sea to the atmosphere using a ship of opportunity". *Biogeosciences* 10, s. 81–99.
- Haavisto, N., L. Tuomi, P. Roiha, S.-M. Siiriö, P. Alenius ja T. Purokoski (2018). "Argo Floats as a Novel Part of the Monitoring the Hydrography of the Bothnian Sea". *Frontiers in Marine Science* 5, s. 324.
- Harashima, A. ja M. Kunugi (2000). "Comprehensive report on marine environmental monitoring and related studies using ferry boats". *CGER-Report. National institute for Environmental Studies, Environmental Agency of Japan*.
- Håkansson, B., P. Alenius ja L. Brydsten (1996). "Physical Environment in the Gulf of Bothnia". *Ambio. Special Report Number 8. The Gulf of Bothnia Year 1991*.
- ICES (2018). *ICES Oceanography CTD and Bottle data*. <http://ocean.ices.dk/HydChem/HydChem.aspx?plot=yes>.
- Jacobsen, A. W. (1948). "An instrument for recording continuously the salinity, temperature, and depth of seawater." *Transactions of the American Institute of Electrical Engineer* 67, s. 714–722.
- Kahru, M. ja S. Nõmmann (1990). "The phytoplankton spring bloom in the Baltic Sea in 1985, 1986: multitude of spatio-temporal scales". *Continental Shelf Research* 10.4, s. 329–354.
- Kaitala, S., J. Kettunen ja J. Seppälä (2014). "Introduction to Special Issue: 5th ferrybox workshop: Celebrating 20 years of the Alg@line". *Journal of Marine Systems* 140, s. 1–3.
- Karlson, B., L. Andersson, S. Kaitala, J. Kronsell, M. Mohlin., J. Seppälä ja A. W. Wranne (2016). "A comparison of FerryBox data vs. monitoring data from research vessels for near surface waters of the Baltic Sea and the Kattegat". *Journal of Marine Systems*.



- Karlson, B., S. Kaitala, H. Lindh, F. Waldh, P. Maunula, V. Fleming-Lehtinen, M. Johansen ja C. Hultkrantz (2010). *A new FerryBox line in the Baltic Sea and the Kattegat for climate change and algal monitoring*. URL: [https://www.ferrybox.org/imperia/md/images/ferryboxusergroup/2010\\_fb\\_ws\\_karlson.pdf](https://www.ferrybox.org/imperia/md/images/ferryboxusergroup/2010_fb_ws_karlson.pdf).
- Kikas, V. ja U. Lips (2016). "Upwelling characteristics in the Gulf of Finland (Baltic Sea) as revealed by Ferrybox measurements in 2007–2013". *Ocean Science* 12, s. 843–859.
- Kuosa, H., V. Fleming-Lehtinen, S. Lehtinen, M. Lehtiniemi, H. Nygård, M. Raateoja, J. Raitaniemi, J. Tuimala, L. Uusitalo ja S. Suikkanen (2017). "A retrospective view of the development of the Gulf of Bothnia ecosystem". *Journal of Marine Systems* 167, s. 78–92.
- Lee, R., S. S Mancini, G. Martinez ja M. Lindsay (2011). "Resolving environmental dynamics in Port Phillip Bay, using high repeat sampling off the Spirit of Tasmania 1". *Coasts and Ports 2011 : Diverse and Developing: Proceedings of the 20th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 13th Australasian Port and Harbour Conference*, s. 404–409.
- Lehmann, A., G. K. ja H. J. (2011). "Detailed assessment of climate variability in the Baltic Sea area for the period 1958 to 2009". *Climate Research*.
- Lentz, W. (1971). "Monatskarte der Temperatur der Ostsee dargestellt für verschiedene Tiefenhorizonte [Monthly maps of the temperature of the Baltic Sea for different depths]". *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*.
- Leppäranta, M. ja K. Myrberg (2009). *Physical oceanography of the baltic sea*. 1. painos. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Łysiak-Pastuszek, E., M. Bartoszewicz, K. Bradtke, M. Darecki, N. Drgas, P. Kowalczyk, W. Kraśniewski, A. Krężel, W. Krzyminiński, Ł. Lewandowski, H. Mazur-Marzec, B. Piliczewski, S. Sagan, K. Sutryk ja B. Witek (2012). "A study of episodic

- events in the Baltic Sea – combined in situ and satellite observations”. *Oceanologia*.
- Marmefelt, E. ja A. Omstedt (1993). ”Deep water properties in the Gulf of Bothnia”. *Continental Shelf Research*.
- McQuatters-Gollop, A. (2013). *The Continuous Plankton Recorder (CPR)*. URL: [http://www.coastalwiki.org/wiki/The\\_Continuous\\_Plankton\\_Recorder\\_\(CPR\)](http://www.coastalwiki.org/wiki/The_Continuous_Plankton_Recorder_(CPR)).
- Measuring Principle of FerryBoxes* (Siteerauspäivä 1.6.2018). FerryBox Task Team. URL: <https://www.ferrybox.org/about/principle/index.php.en>.
- Meyer, H. A., K. Möbius, G. Karsten ja V. Hensen (1873). ”Die Expedition zur physikalisch-chemischen und biologischen Untersuchung der Ostsee im Sommer 1871 auf S. M. Avisodampfer Pommerania”. *Jahresber. Comm. Wiss. Unters. Dt. Meere. Kiel. f. d. J. 1871*.
- Oceanic Research; International Association for the Physical Sciences of the Oceans, I. O. C. S. C. on (2015). *The International thermodynamic equation of seawater –2010: calculation and use of thermodynamic properties. [includes corrections up to 31st October 2015]*. Intergovernmental Oceanographic Commission Manuals ja Guides. Paris, France, UNESCO,
- Ojaveer, E. (2001). ”HISTORY OF MARINE RESEARCH IN ESTONIA”. *Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.* 50, s. 53–65.
- Palmén, E. (1930). ”Untersuchungen über die Strömungen in den Finnland umgebenden Meeren”. *Soc. Scient. Fenn., Comm. Phys.-Math.* 12, s. 1–41.
- Palosua, E. (1973). ”Bottenhavet och Bottenviken -två olika bäcken av Bottniska Viken”. *Terra*.
- Petersen, W. (2013). ”FerryBox Systems: State of the art and incorporation in European Observation Networks”.

- Petersen, W. (2014). "FerryBox systems: State-of-the-art in Europe and future development". *Journal of Marine Systems* 140, s. 4–12.
- Petersen, W., F. Colijn, D. Hydes ja F. Schroeder (2007). "FerryBox: From On-line Oceanographic Observations to Environmental Information". *EuroGOOS Publications* 25.
- Petersen, W., M. Petschatnikov, F. Schroeder ja F. Colijn (2003). "FerryBox systems for monitoring coastal waters". Elsevier Oceanography Series 69. Toim. H. Dahlin, N. Flemming, K. Nittis ja S. Petersson, s. 325–333.
- Pettersson, O. ja G. Ekman (1897). *De hydrografiska förändringarne inom Nordsjöns och Östersjöns område under tiden 1893-1897*. Vol. 29. Kongliga Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar 5. Kungl. boktryckeriet. P.A. Norstedt & Söner.
- Purokoski, T., E. Aro ja A. Nummelin (2013). "First Long-Term Deployment Of Argo Float in Baltic Sea". English. *Sea Technology* 54.10, s. 41–44.
- Rantajarvi, E. (2003). "Alg@line in 2003: 10 Years of Innovative Plankton Monitoring and Research and Operational Information Service in the Baltic Sea". *Meri, Report Series of the Finnish Institute of Marine Research*.
- Reid, P., J. Colebrook, J. Matthews ja J. Aiken (2003). "The Continuous Plankton Recorder: concepts and history, from Plankton Indicator to undulating recorders". *Progress in Oceanography* 58.2, s. 117–173.
- Räike, A., P. Kortelainen, T. Mattsson ja D. N. Thomas (2012). "36 year trends in dissolved organic carbon export from Finnish rivers to the Baltic Sea". *Science of The Total Environment* 435-436, s. 188–201.
- SBE 38 Digital Oceanographic Thermometer* (2015). Sea Bird scientific.
- SBE 45 MicroTSG Thermosalinograph* (2015). SEA-BIRD Scientific.

- Schneider, B., S.Buecker, S. Kaitala, P. Maunula ja N. Wasmund (2015). "Characteristics of the spring/summer production in the Mecklenburg Bight (Baltic Sea) as revealed by long-term pCO<sub>2</sub> data". *Oceanologia* 57, s. 375–385.
- Seppälä, J. (2009). *Fluorescence properties of Baltic Sea phytoplankton*. Aquatic Sciences, Faculty of Biosciences, University of Helsinki Academic dissertation in Aquatic Sciences.
- SMHI Öppna data (2018). *Oceanografiska observationer*. <http://opendata-download-ocobs.smhi.se/explore/>.
- Sørensen, K., M. Grung ja R. Röttgers (2017). "An intercomparison of in vitro chlorophyll a determinations for MERIS level 2 data validation". *Int. J. Remote Sens.*
- Thermosalinograph* (Siteerauspäivä 29.11.2018). <http://www.aoml.noaa.gov/phod/tsg/index.php>. NOAA (National Oceanic, Atmospheric Administration), Atlantic Oceanographic ja Meteorological Laboratory, Physical Oceanography division (PhOD).
- Uotila, P., T. Vihma ja J. Haapala (2015). "Atmospheric and oceanic conditions and the extremely low Bothnian Bay sea ice extent in 2014/2015". *Geophysical Research Letters* 42(18), s. 7740–7749.
- Voipio, A., toim. (1981). *The Baltic Sea*. Elsevier, Amsterdam.
- Voynova, Y. G., H. Brix, W. Petersen, S. Weigelt-Krenz ja M. Scharfe (2017). "Extreme flood impact on estuarine and coastal biogeochemistry: the 2013 Elbe flood". *Biogeosciences* 14, s. 541–557.